



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

Trabajo de Tesis Doctoral

*"FORMULACIÓN, IMPLEMENTACIÓN Y ACOPLAMIENTO DE UN MODELO
DE EXPOSICIÓN AGUDA A UNA NUBE TÓXICA CON MODELOS DE
PROPAGACIÓN DE CONTAMINANTES EN AIRE, PARA SU APLICACIÓN EN
EMERGENCIAS QUÍMICAS"*

Autor

Lic. Erica Yanina Sanchez

Director

Dr. Pablo Miguel Jacovkis

Co-Director

Dr. Atilio Andrés Porta

2012

*"No podemos engañar a la naturaleza, pero
sí podemos ponernos de acuerdo con ella."
Albert Einstein (1879-1955)*

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mis más sinceros agradecimientos al Dr. Pablo Jacovkis y al Dr. Andrés Porta por su confianza y generosidad al compartir sus conocimientos, su apoyo y predisposición para conmigo, desde el primer momento en el que nos conocimos. Del mismo modo manifestar mi admiración hacia sus personas porque además de excelentes profesionales, siempre fueron grandes compañeros y sublimes hombres.

Agradezco también al Ing. Alejandro Acquesta, como jefe del Departamento de Modelado y Manejo de Crisis de CITEDEF, por apostar a mi trabajo y a mi conocimiento pero agradecer por sobre todas las cosas al gran amigo que encontré en él y en su maravillosa familia.

No quiero dejar de nombrar a Mariano Gonzalez que tuvo una gran colaboración en este trabajo, y sin su aporte esta tesis no hubiese logrado el nivel obtenido.

Agradezco también a mis amigos del DMMC de CITEDEF, por los tiempos compartidos y por el clima ameno que siempre me brindaron, haciéndome sentir muy cerca de casa.

A mis compañeros del CIMA en quienes descubrí hermosas personas.

A la Agencia (FONCYT) y al CONICET por haber avalado y sustentado el desarrollo de esta tesis, motivando mi aprendizaje y al mismo tiempo permitiéndome soñar con la hermosa familia que tengo.

A Steven R. Hanna y a sus colaboradores, por facilitarnos las salidas con FLACS -de la simulación en Chicago-.

Agradezco a mis padres por enseñarme a ser quién y cómo soy. Por su orgullo y su amor inmenso. ¡Los amo y extraño!

A mis hermanos y a mis cuñadas/os, simplemente por estar y ser sostén.

A mi hermosa Nonita, por su fortaleza y por tantos recuerdos hermosos que dan vueltas en mi cabeza.

Agradezco a todas las estrellitas que hoy brillan en el cielo y que en algún momento de la vida estuvieron a mi lado. Gracias por brillar y por no soltarme la mano.

Y Finalmente, agradecer con el corazón y el alma a mis tres amores incondicionales: Mia, Cristian y al nuevo angelito que viene en camino, que siempre me acompañaron y resignaron

de hermosos momentos para que mamá pudiera trabajar y perfeccionarse. Gracias por permitirme ser MAMÁ, COMPAÑERA DE VIDA, PROFESIONAL, MUJER y AMA DE CASA. Los amo con el alma!

Gracias a todos por entender que dejarme SER es SENTIRME VIVA.

Sinceramente, Erica Yanina Sanchez.

RESUMEN

Los patrones espaciales y las variaciones en el tiempo de las concentraciones de sustancias peligrosas, junto a los efectos potenciales sobre la población subyacente, son necesarios para ayudar a la planificación y respuesta en una emergencia. A tal fin, resultan de suma importancia tanto los modelos que predicen el transporte y la dispersión de sustancias peligrosas, como los que estiman los efectos potenciales experimentados por la población expuesta. En conjunto, pueden constituir una poderosa herramienta para estimar las regiones vulnerables y evaluar los potenciales impactos en las poblaciones afectadas.

El desarrollo de metodologías y de modelos, de aplicación directa al contexto en que vivimos, permiten acceder a una representación más clara del escenario de riesgo y consecuentemente disponer de las herramientas adecuadas para una respuesta óptima. A través del desarrollo del modelo de exposición DDC (Damage Differential Coupling) en esta tesis, se ha logrado optimizar cuali y cuantitativamente, la estimación de la población afectada por una nube tóxica debido a su capacidad para acoplarse a cualquier modelo atmosférico de dispersión de contaminantes que disponga de una salida de datos en forma temporal. De este modo, DDC analiza los diferentes perfiles de concentración (salida del modelo de transporte) y los asocia con alguna concentración de referencia de alerta (LOC) para así identificar las áreas de riesgo.

El análisis de dos escenarios, Chicago-USA y Pilar- ARGENTINA, a través del acoplamiento de DDC con diferentes modelos de transporte, deja en manifiesto en esta tesis la estrecha relación que existe entre un resultado representativo y el tiempo de ejecución de los modelos. Del mismo modo, queda en evidencia la necesidad de contar con la evolución temporal de la nube tóxica y de las regiones de afectación para la adecuada toma decisiones en la planificación y respuesta a la emergencia.

ABSTRACT

The spatial and temporal variations of concentrations of hazardous materials, with the information of potential effects on the underlying population, are needed to assist in emergency planning and response. To this end, both the models that predict the transport and dispersion of hazardous materials as the models who consider the potential effects experienced by the exposed population are important. Together, they can be a powerful tool to estimate vulnerable regions and evaluate potential impacts on affected populations.

The development of methodologies and models, direct application to the context in which we live, provides a clearer representation of the risk scenario. Qualitative and quantitative estimation of the population affected by a toxic cloud has been optimized in this thesis through the development of DDC exposure model (Differential Damage Coupling), due to its ability to fit any model of atmospheric dispersion of pollutants with an output data temporarily. Thus, DDC discusses the concentration different profiles (transport model output) and associated with some alert concentration (LOC) in order to identify risk areas.

This thesis presents the analysis of two scenarios, Chicago-USA and Pilar-ARGENTINA, through the coupling of DDC with different atmospheric dispersion models, leaving demonstrated the close relationship between a representative result and runtime of models. Similarly, it is evident the need for the time evolution of the toxic cloud and the regions of risk for appropriate decision making in emergency planning and response.

TABLA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS.....	3
RESUMEN.....	5
ABSTRACT.....	6

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN A LA PROBLEMÁTICA.....15

1 EMERGENCIA: DEFINICIONES Y ESTRATEGIAS DE RESPUESTA.	15
1.1 MANEJO Y PLANIFICACIÓN DE EMERGENCIAS	16
1.2 LA IMPORTANCIA DE LA ACCIÓN SOBRE LA SALUD EN SITUACIONES DE EMERGENCIA.....	17
1.3 VULNERABILIDADES Y CAPACIDADES DE LAS POBLACIONES AFECTADAS POR UN DESASTRE	18
2 PROYECTO MARCO: SISTEMA CRISIS	19
2.1 ANTECEDENTES	20
2.2 HIPÓTESIS DE TRABAJO PARA EL DESARROLLO DEL SISTEMA CRISIS.....	21
3 EL SISTEMA CRISIS PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE EMERGENCIAS	26
3.1 HERRAMIENTAS DEL SISTEMA CRISIS	27
4 OBJETIVOS	34

CAPÍTULO II: ESTRATEGIAS DE EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN 36

1 INTRODUCCIÓN.....	36
1.1 DEFINICIÓN DE CONCEPTOS BÁSICOS.....	36
1.1.1 <i>Xenobiótico</i>	36
1.1.2 <i>Tóxico</i>	36
1.1.3 <i>Exposición</i>	37
1.1.4 <i>Ruta de exposición</i>	37
1.1.5 <i>Efecto tóxico</i>	37
1.1.6 <i>Toxicología Ambiental</i>	37
1.1.7 <i>Carga tóxica (L)</i>	38
1.1.8 <i>Dosis y Dosaje</i>	38
1.1.9 <i>Peligro y Riesgo</i>	38
1.1.10 <i>Interacciones químicas</i>	39

1.1.11	Escenario de exposición	39
2	ANÁLISIS DE METODOLOGÍAS VIGENTES PARA LA ESTIMACIÓN DEL NIVEL DE DAÑO ANTE EXPOSICIONES AGUDAS	39
3	METODOLOGÍA	43
3.1	ÍNDICES TOXICOLÓGICOS	44
3.2	PERFILES	45
3.3	EXISTENCIA DE UN CAMPO CONTINUO	47
3.4	NO CONMUTATIVIDAD	50
3.5	ESTIMACIÓN DEL NIVEL DE DAÑO MÁXIMO Y MÍNIMO	50
3.5.1	Acoplamiento Directo	51
3.5.2	Acoplamiento Reverso	53
3.5.2.1	Acoplamiento reverso maximal (MRC)	53
3.5.2.2	Acoplamiento reverso minimal (mRC)	55

CAPÍTULO III: DISTRIBUCIÓN DE CONTAMINANTES EN AIRE57

1	INTRODUCCIÓN	57
1.1	ANÁLISIS DE MODELOS DISPONIBLES DE TRANSPORTE DE CONTAMINANTES EN AIRE	57
1.2	MARCO TEÓRICO DE FLUIDODINÁMICA	58
1.2.1	Introducción a los flujos turbulentos	60
2	METODOLOGÍA	62
2.1	FORMULACIÓN DE MODELO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS	62
2.2	PARAMETRIZACION	65
2.2.1	Estabilidad atmosférica: clasificación	65
2.2.2	Perfil de Velocidades del Viento	67
2.3	CONDICIÓN INICIAL	68
2.4	CONDICIONES DE CONTORNO	68
2.5	RESOLUCIÓN NUMÉRICA DE LA ECUACIÓN DE DIFUSIÓN-ADVECCIÓN-REACCIÓN CON UN ESQUEMA DE SEPARACIÓN DE OPERADORES	69
2.5.1	Mallado	69
2.5.2	Método Splitting	69
2.5.3	Discretización espacial y temporal: Método de diferencias finitas (upwind) con un esquema implícito	70
2.5.4	Obtención de campo de concentraciones: Algoritmo de Thomas	76

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	78
1 COMPARACIÓN CUANTITATIVA DE MÉTODOS DE EXPOSICIÓN VIGENTES CON DDC.....	78
2 ANÁLISIS DE ESCENARIOS.....	81
2.1 ESCAPE EN EL PARQUE INDUSTRIAL PILAR, ARGENTINA	82
2.1.1 <i>Análisis de DDC: acoplamiento con modelo de transporte de gases densos (ALOHA)</i>	83
2.1.1.1 Ventajas y limitaciones de DDC	88
2.1.2 <i>Acoplamiento de DDC con un modelo de dispersión en aire simple</i>	90
2.2 ESCAPE EN CHICAGO, ESTADOS UNIDOS.....	95
2.2.1 <i>Acoplamiento de DDC con un CFD</i>	95
2.2.1.1 Modelos utilizados	95
2.2.1.2 Acoplamiento	96
2.2.1.3 Descripción de un escape hipotético de cloro en el centro de chicago (E.E.U.U)	97
2.2.1.4 Resultados y discusión.....	99
2.2.1.5 Análisis cuantitativo	103
2.2.1.6 Limitaciones del acoplamiento DDC-FLACS	111
2.2.2 <i>Acoplamiento de DDC con un modelo de dispersión en aire simple</i>	111
 CAPÍTULO V: CONCLUSIONES GENERALES	 116
 REFERENCIAS.....	 119

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: EN LA COMUNICACIÓN FORMAL Y VERTICAL, CUANDO SE TRANSMITE INFORMACIÓN NO ESTRUCTURADA, SUELE AFECTARSE NEGATIVAMENTE LA CALIDAD DE LA INFORMACIÓN. EFECTO TELÉFONO DESCOMPUESTO.	23
FIGURA 2: EN LA COMUNICACIÓN TODOS CONTRA TODOS, LA CANTIDAD DE ENLACES CRECE DRAMÁTICAMENTE CUANDO SE CUENTA CON MÁS QUE UNOS POCOS NODOS.	24
FIGURA 3: EN LA COMUNICACIÓN INFORMAL Y TRANSVERSAL UNA NOVEDAD PUEDE TOMAR UN CAMINO INCIERTO, E INCLUSO NO LLEGAR A DETERMINADO NODO. ADICIONALMENTE SE VUELVE DUDOSO QUIÉN FUE EL PROMOTOR.	25
FIGURA 4: UTILIZANDO EL PRINCIPIO DE PIZARRA LA COMUNICACIÓN EFECTIVA TOMA SOLO DOS ACCIONES, LA INFORMACIÓN DE LA SITUACIÓN ES ÚNICA Y ESTÁ A LA VISTA DE TODOS.	26
FIGURA 5: COMPONENTE DE CARTOGRAFÍA DEL SISTEMA CRISIS MOSTRANDO LA CENIZA VOLCÁNICA (SMN). FUENTE: SISTEMA CRISIS, 2011.....	28
FIGURA 6: COMPONENTE DE TAREAS DEL SISTEMA CRISIS - EJERCICIO INTEGRACIÓN 2011. FUENTE: SISTEMA CRISIS, 2011.....	29
FIGURA 7: COMPONENTE DE MEDIOS DEL SISTEMA CRISIS. FUENTE: SISTEMA CRISIS, 2011.....	30
FIGURA 8: COMPONENTE DE MEDIOS DEL SISTEMA CRISIS. LA VISTA CARTOGRÁFICA MUESTRA LOS RECURSOS SOBRE EL MAPA. FUENTE: SISTEMA CRISIS, 2011.....	30
FIGURA 9: COMPONENTE DE MEDIOS DEL SISTEMA CRISIS. BÚSQUEDA DE RECURSOS SOBRE EL MAPA. FUENTE: SISTEMA CRISIS, 2011.	31
FIGURA 10: COMPONENTE DE NOTICIAS DEL SISTEMA CRISIS. LISTADO DE ALERTA DE FOCOS DE CALOR (CONAE). FUENTE: SISTEMA CRISIS, 2011.....	31
FIGURA 11: COMPONENTE DE NOTICIAS DEL SISTEMA CRISIS. VISTA SOBRE CARTOGRAFÍA DE ALERTAS DE FOCOS DE CALOR (CONAE). FUENTE: SISTEMA CRISIS, 2011.....	32
FIGURA 12: REPRESENTACIÓN GENÉRICA DE LOS NIVELES 1 Y 2 DE LOS ÍNDICES DISPONIBLES (AEGL EN ESTE CASO) Y UNA GRÁFICA TÍPICA OBTENIDA POR UNIR LOS PARES TIEMPO- CONCENTRACIÓN (PARES DE TIEMPO DE PASO DE LA NUBE Y DE CONCENTRACIÓN MÁXIMA). LOS PUNTOS DE INTERSECCIÓN DETERMINAN LOS VALORES CARACTERÍSTICOS (CONCENTRACIÓN Y TIEMPOS DE EXPOSICIÓN) PARA DEFINIR LAS DISTANCIAS PARA LAS ÁREAS DE INTERVENCIÓN Y ALERTA.....	42
FIGURA 13: (A) REPRESENTACIÓN DE LAS CURVAS DATO DE ISODAÑO CORRESPONDIENTE A LOS TRES NIVELES DE LOS AEGLS PARA EL CLORO. EN (B) Y EN (C) SE MUESTRAN LAS EXTRAPOLACIONES APLICABLES A LOS ERPGs Y A LOS TEELS, RESPECTIVAMENTE.....	46
FIGURA 14: (A) REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS CURVAS DATO DE ISODAÑO PARA EL CLORO. (B) CAMPO CONTINUO DE CURVAS DE ISODAÑO PARA EL CLORO CON UN Δ AEGL DE 0.1, SELECCIONADO ARBITRARIAMENTE.....	49
FIGURA 15: REPRESENTACIÓN DEL $DC\ A \oplus B$ EN UN CAMPO DE AEGLS DEL CLORO. EL DAÑO RESULTANTE DE LA EXPOSICIÓN CONSECUTIVA DE A Y B, $D(A \oplus B)$, ES EQUIVALENTE AL REPRESENTADO POR $D(t'_1 + t_2, C_2)$. ENTONCES $DC = D(t_1, C_1) \oplus D(t_2, C_2) = D(t'_1 + t_2, C_2)$	51

- FIGURA 16: OPTIMIZACIÓN PARA DC , CUANDO LA OPERACIÓN DE ACOPLAMIENTO SE ENCUENTRA ENTRE UNA $CDIE$ DEPENDIENTE DEL TIEMPO Y UNA $CDID$ INDEPENDIENTE DEL TIEMPO, O ENTRE DOS CURVAS DATO DEPENDIENTES DEL TIEMPO, CON $N_{CDIE} > N_{CDID}$. (A) CASO ESPECIAL PARA $C_2 > C_1$, Y (B) CASO ESPECIAL PARA $C_2 < C_1$ 52
- FIGURA 17: EL MRC COMPARA ALT1 (A) Y ALT2 (B), LUEGO LA SOBREESTIMACIÓN CON MENOR NIVEL DE DAÑO ES SELECCIONADA. (A) EL PAR B SE EXPRESA COMO UNA FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL PAR A. EL DAÑO, DEBIDO A LA EXPOSICIÓN CONSECUTIVA REPRESENTADA POR B Y A, $D(B \oplus A)$, ES EQUIVALENTE AL REPRESENTADO POR $D(t'_2 + t_1, C_1)$. LUEGO $MRC_{Alt1} = D(t'_2 + t_1, C_1)$. (B) ALT2 COMPARA LOS NIVELES DE DAÑO ASOCIADOS A LOS PARES A Y B, Y SE ELIGE ENTONCES EL VALOR MÁS GRANDE. EL DAÑO FINAL ES EQUIVALENTE AL REPRESENTADO POR $D(t_1 + t_2, C_g)$. LUEGO $MRC_{Alt2} = D(t_1 + t_2, C_g)$ 54
- FIGURA 18: ESTE EJEMPLO MUESTRA QUE EL ACOPLAMIENTO DE LOS EFECTOS PARCIALES PUEDEN SER NO CONMUTATIVOS Y, ADEMÁS, QUE LA ESTIMACIÓN POR MRC ES MAYOR QUE LA DE DC : $D(A \oplus B) < D(B \oplus A)$ 55
- FIGURA 19: EL MRC COMPARA ALT1 (A) Y ALT2 (B), LUEGO LA SOBREESTIMACIÓN CON MAYOR NIVEL DE DAÑO ES SELECCIONADA. (A) ALT1 COMPARA LOS VALORES DE DAÑO ASOCIADOS A LOS PARES A Y B, Y ELIGE EL DE MENOR VALOR. EL DAÑO ES EQUIVALENTE A $D(t_1 + t_2, C_l)$, Y ENTONCES $mRC_{Alt1} = D(t_1 + t_2, C_l)$. (B) ALT2 COMPARA LOS VALORES DE DAÑO ASOCIADOS A LOS PARES A Y B, Y LUEGO ELIGE EL VALOR MÁS GRANDE. EL DAÑO EQUIVALENTE ES REPRESENTADO POR $D(t_1 + t_2, C_{eq})$, ENTONCES $mRC_{Alt2} = D(t_1 + t_2, C_{eq})$ 56
- FIGURA 20: (A) REPRESENTACIÓN DE UN PERFIL PARA UNA CONCENTRACIÓN CONSTANTE DE 10 PPM DE CLORO DURANTE 480 MIN. LA ESTIMACIÓN DEL DAÑO ATRAVÉS DEL MÉTODO ESPAÑOL Y DE DDC TIENEN EL MISMO RESULTADO FINAL, DEL MISMO MODO QUE LA APROXIMACIÓN MAXIMAL Y MINIMAL COINCIDEN. SIN EMBARGO, SÓLO DDC PUEDE ESTIMAR, TANTO EL NIVEL DE DAÑO EN UN MODO PROGRESIVO COMO LA SEVERIDAD ENTRE DOS CURVAS DATO DE ISODAÑO. DDC MUESTRA QUE EL NIVEL DE DAÑO 3 SE ALCANZARÁ DESPUÉS DE LOS 240 MIN DE EXPOSICIÓN. (B) REPRESENTACIÓN DE UN PERFIL PARA UNA CONCENTRACIÓN CONSTANTE DE 10 PPM DE CLORO DURANTE 60 MIN. TANTO EL MÉTODO ESPAÑOL COMO ALOHA, PROVEEN UN VALOR ENTERO DEL NIVEL DE DAÑO IGUAL A 2 Y DDC DA UN VALOR DE 2.24, DE ESTE MODO DDC OFRECE INFORMACIÓN DE LA PROXIMIDAD A LAS CURVAS DATO DE ISODAÑO. EL PASO DE TIEMPO FUE SELECCIONADO ARBITRARIAMENTE (DT: 0.1 MIN). 79
- FIGURA 21: (A) REPRESENTACIÓN DEL PERFIL PARA UNA CONCENTRACIÓN EN AIRE, CONSTANTE, DE 10 PPM DE CLORO DURANTE 480 MIN CON LA OCURRENCIA DE UN PICO DE CONCENTRACIÓN DE 20 PPM DESPUÉS DE 20 MIN DE EXPOSICIÓN, DURANTE 4 MIN. ES RAZONABLE CONSIDERAR QUE LA TASA DE INCREMENTO SERÁ MAS GRANDE DURANTE EL PERÍODO DEL PICO, PERO QUE LA TASA NO SEGUIRÁ CRECIENDO CUANDO LA CONCENTRACIÓN HAYA RETORNADO A SU VALOR BASE. MIENTRAS QUE EL MÉTODO ESPAÑOL PREVÉ UN NIVEL DE DAÑO 3 SIN TENER EN CUENTA LAS CARACTERÍSTICAS DEL PERFIL, LA ESTIMACIÓN MAXIMAL DE DDC PREVÉ QUE ESTE NIVEL DE DAÑO SE PUEDE ALCANZAR DESPUÉS DE 198.2 MIN, O DESPUÉS DE 201.6 MINUTOS, SEGÚN LA ESTIMACIÓN MÁXIMAL O MINIMAL, RESPECTIVAMENTE. (B) REPRESENTACIÓN DEL PERFIL PARA UNA CONCENTRACIÓN EN AIRE, CONSTANTE, DE 10 PPM DE CLORO DURANTE 60 MIN CON LA OCURRENCIA DE UN PICO DE CONCENTRACIÓN DE 20 PPM DESPUÉS DE 20 MIN DE EXPOSICIÓN, DURANTE 4 MIN. TANTO EL MÉTODO ESPAÑOL COMO EL ALOHA PROPORCIONARÍAN UN NIVEL DE DAÑO 3,

MIENTRAS QUE <i>DDC</i> DARÍA UN VALOR DE DAÑO FINAL DE 2.40 Y 2.42 PARA LA APROXIMACIÓN MINIMAL Y MAXIMAL, RESPECTIVAMENTE.....	81
FIGURA 22: SIMULACIÓN DE UN ESCAPE DE CLORO EN PILAR, REALIZADA POR ALOHA. EN LA FIGURA, LAS REGIONES ROJAS, NARANJAS Y AMARILLAS REPRESENTAN LAS ÁREAS DONDE LAS CONCENTRACIONES DE CLORO EXCEDERÁN LOS VALORES CORRESPONDIENTES A LOS NIVELES 3, 2 Y 1 DE LOS AEGLs, RESPECTIVAMENTE. FUENTE: GOOGLE EARTH, 2011.....	83
FIGURA 23: REPRESENTACIÓN DEL PERFIL DE CONCENTRACIÓN OBSERVADO EN LA CIUDAD DE PILAR. EL EJE HORIZONTAL DE ESTE GRÁFICO REPRESENTA AL TIEMPO (DE 0 A 60 MIN, DESDE QUE SE INICIÓ LA EMISIÓN), Y EL EJE VERTICAL REPRESENTA A LA CONCENTRACIÓN (EXPRESADA EN PPM) EN PILAR. SIMULACIÓN CON ALOHA.	85
FIGURA 24: PERFILES OBSERVADOS A 4, 4.5, 5 Y 5.5 KM VIENTO ABAJO DESDE LA FUENTE EMISORA. SIMULACIÓN REALIZADA CON ALOHA.	85
FIGURA 25: PERFIL OBSERVADO A 5.5 KM VIENTO ABAJO DESDE LA FUENTE EMISORA, JUNTO CON LA ESTIMACIÓN DEL NIVEL DE DAÑO POR LOS TRES MÉTODOS. A LA DERECHA, UN DETALLE DE LA EVOLUCIÓN DEL NIVEL DE DAÑO ES MOSTRADO.	87
FIGURA 26: MODELO SIMPLE- DDC. REPRESENTACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE LA NUBE TÓXICA (PRIMERA COLUMNA) Y DE LAS REGIONES DE DAÑO MAXIMAL (SEGUNDA COLUMNA) PARA EL ESCAPE EN EL PARQUE INDUSTRIAL DE PILAR, EN LOS TIEMPOS DE SIMULACIÓN DE 19, 38, 64 Y 90 MINUTOS. FUENTE: GOOGLE EARTH, 2011.	91
FIGURA 27: MODELO SIMPLE- DDC. REPRESENTACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE LA NUBE TÓXICA (PRIMERA COLUMNA) Y DE LAS REGIONES DE DAÑO MAXIMAL (PRIMERA COLUMNA) PARA EL ESCAPE EN EL PARQUE INDUSTRIAL DE PILAR, EN LOS TIEMPOS DE SIMULACIÓN DE 116 Y 120 MINUTOS. FUENTE: GOOGLE EARTH, 2011.....	92
FIGURA 28: EN EL EJE DE LAS ABCISAS SE REPRESENTA AL TIEMPO DE SIMULACIÓN EN MINUTOS, MIENTRAS QUE EN EL EJE DE LAS ORDENADAS SE MUESTRA AL ÁREA DE COBERTURA EN KM^2 POR LAS REGIONES MAXIMAL Y MINIMAL.	94
FIGURA 29: VISTA SATELITAL DE LOS ESCENARIOS 1 (A) Y 2 (B). EN LA PRIMERA SE VISUALIZA AL NUDO FERROVIARIO CON VISTA AL NORTE. EN LA MISMA IMAGEN SE APRECIA AL RÍO CHICAGO A LA IZQUIERDA DE LA FUENTE, Y LA PRESENCIA DE EDIFICIOS ALTOS HACIA EL NORTE. EN (B) SE VISUALIZA AL MISMO NUDO PERO CON VISTA AL OESTE. EN ESTA IMAGEN ES APRECIABLE EL PREDOMINIO DE CONSTRUCCIONES DE BAJA ALTURA Y EL RÍO CHICAGO, TRANSVERSAL A LA DIRECCIÓN DEL VIENTO ASUMIDA EN ESTE ESCENARIO. FUENTE: GOOGLE MAPS, 2011.	98
FIGURA 30: FLACS- DDC. REPRESENTACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE LA NUBE TÓXICA Y DE LAS REGIONES DE RIESGO GENERADAS POR DDC PARA EL ESCENARIO 1 DE CHICAGO (VIENTO SUR), DONDE 0.31 PPMV ES LA CONCENTRACIÓN QUE DELIMITA A LA NUBE Y A LAS REGIONES, PARA T= 200, 400, 800, 1200, 1600 Y 2000 s.....	101
FIGURA 31: FLACS- DDC. REPRESENTACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE LA NUBE TÓXICA Y DE LAS REGIONES DE RIESGO GENERADAS POR DDC PARA EL ESCENARIO 2 DE CHICAGO (VIENTO ESTE), DONDE 0.31 PPMV ES LA CONCENTRACIÓN QUE DELIMITA A LA NUBE Y A LAS REGIONES, PARA T= 200, 400, 800, 1200, 1600 Y 2000 s.	102
FIGURA 32: ANÁLISIS DE SUPERFICIES DE REGIONES MAXIMAL Y MINIMAL. (A) DIFERENCIA ENTRE LAS DIMENSIONES AREALES DE LAS REGIONES MAXIMAL Y MINIMAL EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE SIMULACIÓN, PARA AMBOS ESCENARIOS. (B) COMPARACIÓN DE LAS DIMENSIONES AREALES DE LAS REGIONES MAXIMAL EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE SIMULACIÓN.	106
FIGURA 33: ANÁLISIS DE POBLACIÓN AFECTADA. (A) POBLACIÓN POTENCIALMENTE AFECTADA EN ESCENARIOS 1 Y 2, EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE EVOLUCIÓN DE LA NUBE DE CLORO. (B) COMPARACIÓN DE LA POBLACIÓN RELATIVA,	

POTENCIALMENTE AFECTADA, EN LOS ESCENARIOS 1 Y 2.
$$\text{Población relativa} = \frac{\text{Población afectada}_i}{\text{Población máxima afectada}}$$
 DONDE

$i = 200, 400, 800, 1200, 1600 \text{ Y } 2000$ ES EL TIEMPO DE SIMULACIÓN. 107

FIGURA 34: FLACS-DDC. REPRESENTACIÓN DE LA EVOLUCION DE LA NUBE TÓXICA (PRIMERA COLUMNA) Y DE LAS REGIONES DE DAÑO MAXIMAL (SEGUNDA COLUMNA) PARA EL ESCENARIO 1 DE CHICAGO SOBRE UNA IMAGEN SATELITAL PROPORCIONA POR GOOGLE EARTH, 2011. TIEMPOS DE SIMULACIÓN: 200, 400, 800 Y 1200 SEGUNDOS. 108

FIGURA 35: FLACS-DDC. REPRESENTACIÓN DE LA EVOLUCION DE LA NUBE TÓXICA (PRIMERA COLUMNA) Y DE LAS REGIONES DE DAÑO MAXIMAL (SEGUNDA COLUMNA) PARA EL ESCENARIO 2 DE CHICAGO SOBRE UNA IMAGEN SATELITAL PROPORCIONA POR GOOGLE EARTH, 2011. TIEMPOS DE SIMULACIÓN: 200 Y 400 SEGUNDOS. 109

FIGURA 36: FLACS-DDC. REPRESENTACIÓN DE LA EVOLUCION DE LA NUBE TÓXICA (PRIMERA COLUMNA) Y DE LAS REGIONES DE DAÑO MAXIMAL (SEGUNDA COLUMNA) PARA EL ESCENARIO 1 DE CHICAGO SOBRE UNA IMAGEN SATELITAL PROPORCIONA POR GOOGLE EARTH, 2011. TIEMPOS DE SIMULACIÓN: 1600 Y 2000 SEGUNDOS. 109

FIGURA 37: FLACS-DDC. REPRESENTACIÓN DE LA EVOLUCION DE LA NUBE TÓXICA (PRIMERA COLUMNA) Y DE LAS REGIONES DE DAÑO MAXIMAL (SEGUNDA COLUMNA) PARA EL ESCENARIO 2 DE CHICAGO SOBRE UNA IMAGEN SATELITAL PROPORCIONA POR GOOGLE EARTH, 2011. TIEMPOS DE SIMULACIÓN: 800, 1200, 1600 Y 2000 SEGUNDOS. 110

FIGURA 38: MODELO SIMPLE-DDC. REPRESENTACIÓN DE LA EVOLUCION DE LA NUBE TÓXICA (PRIMERA COLUMNA) Y DE LAS REGIONES DE DAÑO MAXIMAL (SEGUNDA COLUMNA) PARA EL ESCENARIO 1 DE CHICAGO SOBRE UNA IMAGEN SATELITAL PROPORCIONA POR GOOGLE EARTH, 2011. TIEMPOS DE SIMULACIÓN: 200, 400, 800 Y 1200 SEGUNDOS. 112

FIGURA 39: MODELO SIMPLE-DDC. REPRESENTACIÓN DE LA EVOLUCION DE LA NUBE TÓXICA (PRIMERA COLUMNA) Y DE LAS REGIONES DE DAÑO MAXIMAL (SEGUNDA COLUMNA) PARA EL ESCENARIO 1 DE CHICAGO SOBRE UNA IMAGEN SATELITAL PROPORCIONA POR GOOGLE EARTH, 2011. TIEMPOS DE SIMULACIÓN: 1600 Y 2000 SEGUNDOS. 113

FIGURA 40: COMPARACIÓN DE LAS ÁREAS DE COBERTURA DE LAS REGIONES MAXIMAL, DADAS POR LAS SIMULACIONES CON FLACS Y CON EL MODELOS SIMPLE. 114

FIGURA 41: COMPARACIÓN DE LAS ÁREAS DE COBERTURA DE LAS REGIONES MINIMAL, DADAS POR LAS SIMULACIONES CON FLACS Y CON EL MODELOS SIMPLE. 115

INDICE DE TABLAS

TABLA 1: ESQUEMA DE CÁLCULO PASQUILL-GIFFORD. CLASES DE ESTABILIDAD DE PASQUILL EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO, NIVEL DE INSOLACIÓN Y NUBOSIDAD.....	66
TABLA 2: VALORES PARA EL EXPONENTE P EN FUNCIÓN DE LA CLASE DE ESTABILIDAD Y DEL TIPO DE AMBIENTE.	68
TABLA 3: APROXIMACIÓN DISCRETA DE LA ECUACIÓN DE TRANSPORTE 3.6 MEDIANTE DIFERENCIAS FINITAS.	71
TABLA 4: APROXIMACIÓN DISCRETA DE LA ECUACIÓN DE TRANSPORTE 3.6 MEDIANTE DIFERENCIAS FINITAS. ESQUEMA PARA LA COMPONENTE ADVECTIVA, CON LA CORRECCIÓN UPWIND, BAJO LA CONDICIÓN DE COMPONENTE NEGATIVA EN LA DIRECCIÓN X.	72
TABLA 5: APROXIMACIÓN DISCRETA DE LA ECUACIÓN DE TRANSPORTE 3.6 MEDIANTE DIFERENCIAS FINITAS. ESQUEMA PARA LA COMPONENTE ADVECTIVA, CON LA CORRECCIÓN UPWIND, BAJO LA CONDICIÓN DE COMPONENTE NEGATIVA EN LA DIRECCIÓN Y.	73
TABLA 6: INFORMACIÓN DE ENTRADA PARA LA CORRIDA CON ALOHA.	84
TABLA 7: CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS PERFILES OBSERVADOS A 4, 4.5, 5 Y 5.5 KM DESDE LA FUENTE DE EMISIÓN.	86
TABLA 8: NIVELES DE DAÑO ESTIMADOS DESPUES DEL PASO DE LA NUBE TÓXICA	88
TABLA 9: ÁREA DE COBERTURA DE LAS REGIONES DE DAÑO MAXIMAL PARA LOS TIEMPOS DE SIMULACIÓN DE 19, 38, 64, 90, 116 Y 120 MINUTOS.....	93
TABLA 10: POBLACIÓN, DENSIDAD POBLACIONAL Y ÁREA DE COBERTURA DE LOS BARRIOS DE CHICAGO ALCANZADOS POR EL INCIDENTE DE CLORO. FUENTE: WENDELL COX CONSULTANCY	103
TABLA 11: ÁREA DE COBERTURA Y POBLACIÓN SUBYACENTE DE LAS REGIONES MAXIMAL Y MINIMAL, DE ACUERDO A RANGOS DE NIVEL DE DAÑO, DEL ESCENARIO 1.	104
TABLA 12: ÁREA DE COBERTURA Y POBLACIÓN SUBYACENTE DE LAS REGIONES MAXIMAL Y MINIMAL, DE ACUERDO A RANGOS DE NIVEL DE DAÑO, DEL ESCENARIO 2.	105
TABLA 13: ÁREA DE COBERTURA DE LAS REGIONES DE DAÑO MAXIMAL PARA LOS TIEMPOS DE SIMULACIÓN DE 200, 400, 800, 1200 Y 1600 SEGUNDOS.	113

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN A LA PROBLEMÁTICA

1 EMERGENCIA: DEFINICIONES Y ESTRATEGIAS DE RESPUESTA.

El término emergencia química es utilizado para referirse a un evento que resulta en la emisión no controlada de una o varias sustancias peligrosas para la salud humana, el ambiente y las construcciones edilicias, con costos económicos asociados importantes. Este suceso puede surgir de varias maneras y algunos de los tipos más frecuentes son:

- Incendio, explosión o accidentes en una instalación donde se manipulan o producen sustancias potencialmente peligrosas;
- Incidentes en almacenes o depósitos que contienen grandes cantidades de varios productos químicos distintos;
- Incidentes durante el transporte de sustancias químicas;
- Uso inadecuado de productos que dé lugar a contaminación de alimentos, del agua, del ambiente, etc.;
- Manejo inadecuado de desechos, tales como disposición no controlada de productos peligrosos ó tóxicos, falla en los sistemas de disposición de desechos o incidentes en plantas de tratamiento de aguas residuales;
- Emergencias químicas originadas como consecuencia de un desastre natural (terremotos, huracanes o tornados, inundaciones, etc.);
- Atentado con armas químicas.

El impacto de la emergencia química puede ser descripto desde la perspectiva de la evaluación de riesgo. El riesgo asociado a una sustancia química se define como la probabilidad de que dicha sustancia produzca daño a un organismo bajo condiciones específicas de exposición. De igual manera, si lo asociamos a los incidentes que involucran sustancias peligrosas, sería la

probabilidad de la ocurrencia de este tipo de evento con sus efectos correspondientes sobre la salud y/o el ambiente.

Varios factores contribuyen a la ocurrencia de emergencias químicas y a su impacto sobre la salud pública. Estos factores relacionan tanto a los agentes químicos involucrados como a los receptores. Para que se presente un incidente con sustancias peligrosas, éstas deben estar en situaciones en las que puedan liberarse, explotar o incendiarse. Generalmente, los errores humanos, las fallas de equipos o los factores relacionados con la contención o resguardo de sustancias peligrosas crean condiciones propicias para la ocurrencia del evento, cuyas consecuencias van a depender tanto de la cantidad que es emitida como de las características propias de la(s) sustancia(s) involucrada(s) tales como toxicidad aguda y crónica, corrosividad, inflamabilidad, explosividad, etc.

Los incidentes con materiales peligrosos varían desde los relativamente confinados en un lugar específico hasta los que se expanden al punto en que es probable que pongan en peligro a la comunidad entera. Actualmente, con las características de las herramientas de que se dispone, resulta complejo, y hasta a veces sobreestimado, la delimitación del territorio sobre el que impacta la fuente emisora y en donde se encuentra la población en riesgo, ya que en el escenario intervienen las características geográficas del terreno, las condiciones meteorológicas (dirección y velocidad de los vientos predominantes, lluvias), el carácter de las edificaciones, el tipo de población (urbana o rural), el tipo y cantidad de sustancias químicas liberadas, y la variable tiempo, entre las más importantes. Por tal motivo, resulta fundamental poder describir cuantitativamente las interacciones entre estos factores, mediante alguna herramienta eficaz que contribuya al análisis de la dinámica de las especies químicas en la atmósfera y el consecuente impacto sobre los objetivos de interés.

1.1 MANEJO Y PLANIFICACIÓN DE EMERGENCIAS

Las situaciones de crisis o emergencia demandan la eficaz interacción entre múltiples organizaciones con culturas organizacionales muy distintas y bajo la presión del devenir de los acontecimientos. Además les demandan coordinar la utilización de los recursos materiales escasos con que cada una cuenta, administrar los insumos y provisiones que la sociedad entrega para los afectados y gestionar la acción de recursos humanos disponibles para dar respuesta a la situación intentando lograr la mayor sinergia posible. Es necesario gestionar y ponderar la información (referida tanto sobre los aspectos antes mencionados como sobre la

evolución del fenómeno de origen) de que se dispone para la toma de decisiones debido a que la misma nunca es absolutamente oportuna, completa ni veraz. En pocas palabras: para obtener respuestas eficientes a situaciones de emergencias, se requiere una estrecha coordinación y colaboración con otros sectores para garantizar que las necesidades sean atendidas, que no se dupliquen los esfuerzos, que se utilicen los recursos de manera óptima y que la calidad de los servicios sea adecuada.⁽¹⁾ Sin embargo, este conjunto de pautas no puede cumplirse en su totalidad, si se desconoce cómo evoluciona el fenómeno y su potencial impacto sobre la población. Este desconocimiento puede incurrir en, por ejemplo, el inapropiado uso de los recursos (situación preocupante en países en vías de desarrollo, donde los recursos son limitados), toma de decisiones no acertadas, etc. Por lo contrario, una estimación más detallada y dinámica de la distribución de concentraciones y del daño sobre la población expuesta puede ofrecer un mejor conocimiento de la situación y del tiempo disponible para la intervención oportuna.

Los especialistas en la materia están convencidos que para mejorar la respuesta frente a una emergencia es necesario mejorar la preparación. La **planificación** se basa en un análisis de los riesgos y está estrechamente vinculada con los sistemas de alarma temprana. La preparación incluye la planificación de contingencia, el almacenamiento de equipos y suministros, el establecimiento y/o el mantenimiento de servicios de emergencia y una estructura en estado de alerta, comunicaciones, una estructura de gestión de la información y coordinación, la capacitación del personal, la planificación a nivel de la comunidad y los entrenamientos, entre otros. Para lograr los ítems mencionados, es necesario contar con una simulación que represente eficazmente al fenómeno. De este modo, es posible hacer una evaluación temprana de los alcances de la emergencia y del grado de impacto sobre la población y los bienes. En este sentido, como se desarrollará en el capítulo II, los modelos de distribución del tipo CFD son los más adecuados para un análisis profundo en áreas densamente pobladas.

1.2 LA IMPORTANCIA DE LA ACCIÓN SOBRE LA SALUD EN SITUACIONES DE EMERGENCIA

El acceso a la atención de salud es un factor crucial para la supervivencia en las etapas iniciales de una emergencia. Los desastres tienen casi siempre efectos significativos en la salud pública y en el bienestar de las poblaciones afectadas. Esos efectos pueden ser directos: como por ejemplo la muerte a causa de la exposición, o indirectos: como el aumento de las tasas de

enfermedades infecciosas y/o la malnutrición. Estos efectos indirectos suelen estar relacionados con factores como la cantidad y la calidad inadecuada del agua, la destrucción de las instalaciones de evacuación sanitaria, la interrupción o reducción del acceso a los servicios de salud y el deterioro de la situación de seguridad alimentaria. La falta de seguridad, las restricciones al movimiento, los desplazamientos forzados y el deterioro de las condiciones de vida (hacinamiento y alojamiento inadecuado) también pueden constituir amenazas a la salud pública. Por su parte, el cambio climático puede aumentar la vulnerabilidad y el riesgo de las poblaciones.

Los objetivos primordiales de la respuesta humanitaria en caso de crisis son prevenir y reducir la mortalidad y la morbilidad excesivas. La función del sector de salud es prestar servicios de salud esenciales, con inclusión de respuestas de prevención y promoción que contribuyen eficazmente a reducir los riesgos. Se llama servicios de salud esenciales a las respuestas de carácter prioritario que abordan eficazmente las principales causas del exceso de mortalidad y morbilidad. **La manera en que se planeen, organicen y ejecuten las respuestas de salud en casos de desastre puede reforzar o socavar los sistemas de salud existentes y su futura recuperación y desarrollo.** Puede ocurrir que en las primeras fases de una emergencia la información sea incompleta y haya que tomar importantes decisiones de salud pública sin disponer de todos los datos pertinentes; pero en cuanto sea posible se debe llevar a cabo una evaluación multisectorial. ⁽¹⁾

1.3 VULNERABILIDADES Y CAPACIDADES DE LAS POBLACIONES AFECTADAS POR UN DESASTRE

Es muy importante comprender que una persona no es más vulnerable ni está expuesta a un mayor riesgo meramente porque es joven, o de edad avanzada, porque es una mujer o una persona con discapacidad, o que posee HIV. Es más bien la combinación de varios de esos factores lo que lleva a ese resultado. Así por ejemplo, una persona de más de 70 años que vive sola y no goza de buena salud, será sin duda más vulnerable que una persona de la misma edad y con el mismo estado de salud pero que vive rodeada por una familia numerosa y que tiene un ingreso suficiente. Análogamente, una niña de 3 años es mucho más vulnerable cuando no está acompañada que si estuviera cuidada por padres responsables.

En la medida en que se aplican las normas que rigen para las acciones de salud y se implementan las acciones clave, el análisis de la vulnerabilidad y la capacidad permite asegurar que la respuesta en casos de desastre se dirige efectivamente a las personas que tienen derecho a una asistencia sin discriminación y que más lo necesitan. Para ello, se precisa una comprensión cabal del contexto local y de la manera en que una determinada crisis afecta de diferentes formas a grupos específicos de personas a causa de vulnerabilidades ya existentes. Las emergencias pueden agravar las disparidades que ya existían. Por ello, es esencial preconizar las estrategias que permiten a las personas hacer frente a una situación, y potenciar su resiliencia y su recuperación. Asimismo, es necesario promover y reforzar sus conocimientos, competencias y estrategias, reforzar su acceso a los servicios de apoyo social, jurídico, financiero y psicosocial, así como ayudarlas a salvar los diversos obstáculos físicos, culturales, económicos y sociales con los que pueden tropezar al buscar un acceso equitativo a dichos servicios. ^(1, 2)

2 PROYECTO MARCO: SISTEMA CRISIS

El actual grado de desarrollo en la gestión integral de emergencias y desastres, tanto en nuestro país como en otros, nos ha motivado a emprender los objetivos de esta tesis que se detallarán más adelante y que se enmarcan en uno de los proyectos del desarrollo del Sistema CRISIS. ⁽³⁾

El Sistema CRISIS es una herramienta informática, de aplicación web, diseñada y desarrollada para dar respuesta cooperativa a las situaciones de emergencia, ofreciendo robustez y flexibilidad en las comunicaciones, un uso más eficiente de los recursos, una organización dinámica acorde a la emergencia, el contacto directo entre todos los actores de la emergencia, una unificación de la carta de situación, el acceso a más y mejor información, y el contacto directo con los proveedores de la información. ⁽⁴⁻⁶⁾

Para entender cómo funciona este sistema es necesario pensar qué ocurre “normalmente” (valga aquí la paradoja del término) en un contexto de catástrofe imprevista. La incertidumbre y la demanda de información son una constante; otra es que quienes generan la información necesaria (como los institutos de epidemiología, de prevención sísmica, el Instituto Nacional del Agua, el Servicio Meteorológico Nacional o el INDEC, que puede informar cuánta gente habita el área afectada) no son los mismos que deben tomar las decisiones claves (autoridades nacionales, provinciales y municipales), ni tampoco quienes darán asistencia en el lugar de los

hechos: policía, bomberos, médicos, enfermeros, líderes comunitarios, fuerzas de rescate, transportes para evacuación y una lista de actores sociales cuya extensión y diversidad dependerán del hecho en cuestión.

A todo esto, las instituciones suelen desconocer sus propios recursos materiales y humanos reales disponibles, y más aún los de otras instituciones con las que en medio de la crisis tendrán que interactuar. O puede ser que esa información exista pero no esté al alcance de los responsables de tomar las decisiones en el momento preciso.

Por otra parte, hay brechas entre los diversos lenguajes institucionales, “diferencias de código” que se suscitan, por ejemplo, entre la policía, el personal de la salud, una institución científica o una ONG que recolecta donaciones para socorrer a los afectados. Todo esto, en medio de una cotidianidad completamente alterada y donde la gente teme por su vida y la de sus allegados, vecinos y compañeros.

En tales contextos, las organizaciones necesitan vincularse de manera diferente a la normal para dar respuestas adecuadas. Dependiendo del área afectada, las jurisdicciones suelen chocar sin que haya tiempo para la discusión política. La información suele ser contradictoria, y hay vidas y recursos en peligro.

Cada institución conectada a esta red tiene sus atributos: Están las que sólo suministran información primaria y luego la ponen a disposición de los decisores, básicamente las autoridades políticas. Así, estas instituciones, en lugar de acudir a sus canales habituales van como primera opción a ese espacio único y común que funciona como una “gran pizarra”. Las decisiones serán, entonces, información volcada en este mismo espacio para que esté accesible a quienes tengan que actuar en consecuencia. De este modo, todos actúan en un contexto de menor incertidumbre.⁽⁷⁾

2.1 ANTECEDENTES

El desarrollo del sistema Crisis se lleva a cabo en el Departamento de Modelado y Manejo de Crisis (DMMC) del Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa (CITEDEF) que forma parte del Ministerio de Defensa de la República Argentina. Este departamento trabaja desde el año 2003 en el desarrollo de herramientas informáticas confiables para el manejo de emergencias a escala nacional. A lo largo de estos años DMMC ha participado en ejercicios bilaterales de manejo de emergencias con Chile, Bolivia y Perú, y en seminarios

internacionales de tecnologías para manejo de crisis. Ha colaborado, también, en el seguimiento de la erupción del Volcán Chaitén, el siniestro a bordo del Rompehielos Irizar y las inundaciones en río Mamoré en Bolivia, del mismo modo ha proporcionado apoyo al Ministerio de Salud de la Nación durante el alerta epidemiológico por influenza A (H1N1) utilizando el Sistema CRISIS como la primera red nacional de defensa para manejo de emergencias.

Desde mayo de 2010, las Fuerzas Armadas utilizan el Sistema CRISIS como herramienta de coordinación para apoyo a operaciones de defensa civil. Fue utilizado en el apoyo al terremoto de Chile para coordinación con el hospital reubicable de la fuerza aérea en la localidad de Curicó. Recientemente el Sistema CRISIS se ha utilizado en el ejercicio Integración 2011 entre Argentina, Bolivia y Perú, con gran participación de la provincia y de la ciudad de Salta.

Actualmente se evalúa su adopción en el Consejo de Defensa de UNASUR, en la sala de crisis de la Cancillería argentina, en la Municipalidad de Vicente López, y en las localidades de Gral. Alvear, Malargüe y San Rafael en Mendoza. Al día de la fecha, el Sistema CRISIS está participando de un proyecto para utilizar el core en un sistema de monitoreo y alerta temprana en las localidades afectadas por la ceniza volcánica pertenecientes a las provincias de Neuquén y Río Negro.

2.2 HIPÓTESIS DE TRABAJO PARA EL DESARROLLO DEL SISTEMA CRISIS

Las siguientes ideas que orientaron al diseño del Sistema CRISIS han surgido de las necesidades de los respondedores, del estudio de emergencias pasadas y de la necesidad de resolver problemas de coordinación entre instituciones, y constituyen las hipótesis de trabajo.

i. Mejor información permite mejores decisiones

Es fácil ver que la calidad de la información se ve afectada cuando ésta no es completa, oportuna o veraz. El sistema CRISIS ofrece principalmente herramientas para advertir una situación con anticipación, para integrar información propia y ajena, y para validar dicha información y desalentar la existencia de toda aquella que sea obsoleta. Por lo expuesto, consideramos que la mejora en cada aspecto de la calidad de la información contribuye a la mejora de la información en su conjunto, asistiendo a la toma de mejores decisiones (ver punto vi.).

ii. Si no se usa en prevención, no se usará en respuesta

Analizando las emergencias y desastres, es evidente que los eventos (y/o sus efectos) cambian de escala, jurisdicción y severidad. Algo que comienza como un problema municipal, puede escalar al nivel provincial y eventualmente al nacional, o bien puede además afectar al municipio vecino. Algo que comienza como un problema sanitario, puede afectar al transporte, al trabajo, a la educación, a la producción, etc. Del mismo modo, el conjunto de instituciones involucradas en la respuesta en un momento dado tienen la tendencia a variar, tanto sean nacionales, provinciales, municipales, no gubernamentales o privadas. Es por este motivo que el sistema se diseñó para facilitar que la estructura de la red que da respuesta aumente su tamaño, uniendo redes existentes y conectando nuevas instituciones, cuando la situación crece en complejidad y que pueda reducirse sin perder funcionalidad cuando la escala del problema se reduce. Sería un error proponer una red de miles de nodos actuando vinculados en ausencia de una gran emergencia, y es mejor sostener el funcionamiento de pequeñas redes locales que se vinculen entre sí formando una red mayor cuando la situación lo amerite.

iii. Para acompañar un cambio, hay que ser flexible

Desde las primeras entrevistas a instituciones, fue algo manifiesto que el modo actual de manejar la información es muy disímil. Existen organizaciones que manejan su información de forma pública y transparente, y existen otras que limitan al mínimo la información que trasciende las fronteras de su organización. Si bien la tendencia internacional, a la que nuestro país suscribe, impulsa leyes que garantizan el acceso a la información pública, falta un trecho para que se trabaje de ese modo en nuestro medio. Sin embargo, sería un error esperar que se adopte una herramienta que modifique y uniformice la manera de trabajar de todos. El sistema se diseñó para permitir que cada participante decida y establezca la política de acceso a la información de la que es dueño. En palabras simples cada institución decide con quién comparte (y con quién no) su información. A medida que vaya cambiando la cultura de las organizaciones, la herramienta tiene que ser capaz de acompañar dicho cambio, permitiendo que los usuarios compartan lo que consideren adecuado.

iv. Metodología y tecnología, un ciclo realimentado y evolutivo

El avance permanente de la tecnología, y la evolución de las metodologías de gestión de riesgo y respuesta a desastres, no son fenómenos del todo independientes. Consideramos

que, con cada cambio en la metodología, hay un desafío tecnológico para acompañarlo, y con cada avance tecnológico aparecen nuevas herramientas para que la metodología las aproveche y avance. Dado que la permeabilidad entre ambos conceptos acelera este ciclo virtuoso, se decidió trabajar formando equipos multidisciplinares, y alentando una formación mixta para los recursos humanos.

v. Comunicación eficiente y redundante: concepto de pizarra

Primer paradigma de la coordinación: *la comunicación formal y vertical*. En una estructura burocrática ideal, las comunicaciones se inspiran en principios de economía y eficiencia, información estructurada y decisiones programadas. Las comunicaciones son siempre formales y recorren sistemáticamente la estructura arbórea del organigrama. Está pensado para situaciones repetitivas y conocidas, por lo que pueden registrarse en formularios y tener un tratamiento determinístico. Este esquema tiene serias desventajas para sostener un flujo de información eficiente durante las emergencias:

- (1)** En una estructura arborescente hay solo un camino para llegar de un nodo a otro, por lo que cualquier interrupción en la cadena hace imposible la comunicación, y que en el mejor de los casos la comunicación debe atravesar todas las oficinas intermedias.
- (2)** En las emergencias o desastres, la información resulta inesperada o al menos poco repetitiva, lo que hace muy difícil estructurar su contenido y por ende su tratamiento.
- (3)** La suma de 1 y 2 hace que la información se transmita de un nivel al siguiente y se deba interpretar en cada eslabón de la cadena de comunicaciones (ver Figura 1).

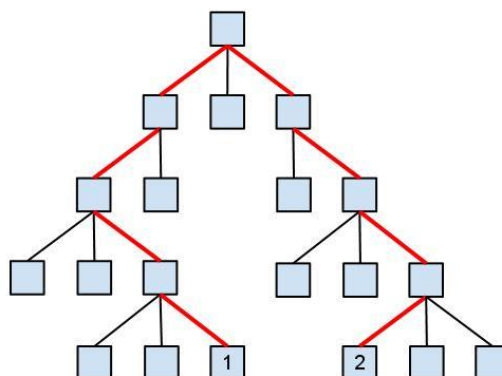


FIGURA 1: EN LA COMUNICACIÓN FORMAL Y VERTICAL, CUANDO SE TRANSMITE INFORMACIÓN NO ESTRUCTURADA, SUELE AFECTARSE NEGATIVAMENTE LA CALIDAD DE LA INFORMACIÓN. EFECTO TELÉFONO DESCOMPUESTO.

De este modo, el resultado en cada tramo de la comunicación es crítico, la información es transmitida sin redundancia y si llega a destino lo hará con la máxima demora y con varias interpretaciones concatenadas que degradan al mensaje original. Dicho de otro modo: “El juego del teléfono descompuesto”.

La experiencia, junto con lo expuesto en el párrafo anterior, avala el concepto de que a menudo las coordinaciones necesiten apoyarse en la organización informal, siendo luego validadas por la máxima autoridad.

El segundo paradigma de la coordinación: *la comunicación informal y transversal* permite una comunicación directa entre instituciones, acortando el tiempo de recepción, eliminando las interpretaciones intermedias a la información y multiplicando los caminos de comunicación. Este enfoque sin embargo, presenta una amenaza: la complejidad de una red de todos contra todos crece cuadráticamente con el número de nodos como se muestra en la Figura 2. Por lo tanto, en una red de 5 nodos se necesitarán 10 mensajes para comunicar a todos con todos mientras que en una red de 10 nodos se necesitarán 45 mensajes para tal fin. Por lo expuesto, se concluye que este esquema es válido para un puñado de actores pero se vuelve inmanejable para más allá de una decena.

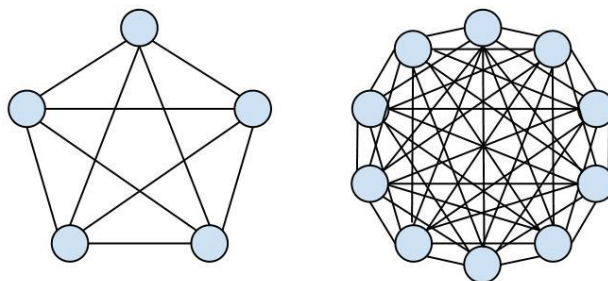


FIGURA 2: EN LA COMUNICACIÓN TODOS CONTRA TODOS, LA CANTIDAD DE ENLACES CRECE DRAMÁTICAMENTE CUANDO SE CUENTA CON MÁS QUE UNOS POCOS NODOS.

Para redes más grandes, cada nodo se comunicará solamente con un pequeño vecindario de otros nodos con quién tienen experiencia de trabajo en común, jurisdicciones compartidas o vecinas, y en ocasiones cuando hay conocimiento personal entre los individuos.

Cabe mencionar que en muchas ocasiones, el esquema de la comunicación informal y transversal es eficiente y suficiente, en particular para enfrentar situaciones que se

observaron en el pasado reciente. Sin embargo, cuando cambian las personas en las organizaciones, se “pierden” contactos y referentes y en consecuencia la dinámica se tambalea. Por otra parte, hay una tendencia a la incertidumbre puesto que las novedades y las consultas entre dos nodos no vinculados por contactos directos, viajan por un camino incierto y complejo. Por este mismo motivo la información válida llega a algunos nodos prácticamente como un rumor puesto que no se conoce fácilmente la fuente original (Figura 3).

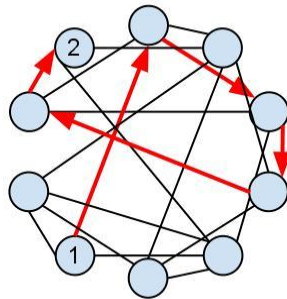


FIGURA 3: EN LA COMUNICACIÓN INFORMAL Y TRANSVERSAL UNA NOVEDAD PUEDE TOMAR UN CAMINO INCIERTO, E INCLUSO NO LLEGAR A DETERMINADO NODO. ADICIONALMENTE SE VUELVE DUDOSO QUIÉN FUE EL PROMOTOR.

La propuesta del DMMC para abordar este tema está inspirada en una técnica de coordinación de sistemas multiagente proveniente de la inteligencia artificial y aplicada a la comunicación entre personas: **La arquitectura de pizarra**. Este concepto se puede entender como la conceptualización de la siguiente metáfora: *Un grupo de expertos intenta encontrar una solución a un problema común. Puesto que la tarea es tan compleja que no la pueden realizar individualmente, los expertos han de cooperar, coordinando sus actividades. Para ello se agrupan alrededor de una pizarra, mediante la que intercambian sus aportaciones respecto a la solución del problema. Contemplan la pizarra, y cuando consideran que pueden contribuir a una solución, piden un trozo tiza y escriben sus contribuciones en la pizarra. De lo contrario, permanecen inactivos. Este proceso termina, cuando un experto detecta que la pizarra contiene una solución global al problema. Pese a que la definición pertenece a la inteligencia artificial ^(8, 9) su enfoque es aplicable a la coordinación eficiente entre personas.*

Como muestra la Figura 4, si todos los nodos de una red de instituciones tienen acceso a registrar sus novedades y aportes en un espacio de datos compartido, y a su vez pueden

consultar la totalidad de la información allí registrada antes de tomar una decisión, la cantidad de comunicaciones necesarias para tomar una decisión informada es 2 (la notificación y la consulta), independientemente del número de nodos participantes. Esto hace a la información más oportuna (puesto que está disponible antes), más completa (puesto que se tiene acceso a la información propia y a la compartida por otros) y más veraz (puesto que la información no tiene escalones de interpretación entre quién decide y quién informa).

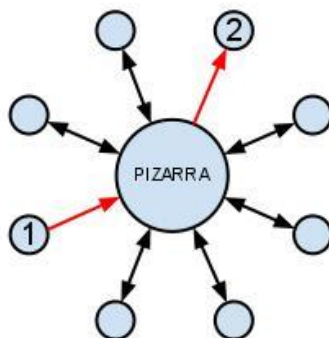


FIGURA 4: UTILIZANDO EL PRINCIPIO DE PIZARRA LA COMUNICACIÓN EFECTIVA TOMA SOLO DOS ACCIONES, LA INFORMACIÓN DE LA SITUACIÓN ES ÚNICA Y ESTÁ A LA VISTA DE TODOS.

3 EL SISTEMA CRISIS PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE EMERGENCIAS

Por sus características, el Sistema CRISIS ofrece una gama de herramientas para diversos tipos de usuarios conectados a través de Internet. Este sistema facilita el acceso a la información de la planificación y respuesta, posibilitando el contacto con las autoridades pertinentes para solicitar y ofrecer recursos, facilitando la planificación y la respuesta a emergencias y desastres. La aplicación provee carta de situación unificada, consulta y manejo de información georreferenciada, estructuras de datos no restrictivas, soporte para alertas tempranas, comunicación entre las instituciones participantes, acceso a fuentes de información externa e interfaz de usuario amigable.

A continuación, se hace mención a los alcances del Sistema CRISIS en la gestión integral de la emergencia: ⁽¹⁰⁾

- **En la prevención:** permitir ejercitar, analizar y difundir los procedimientos de respuesta, conformar una base de datos descentralizada de recursos disponibles para una potencial crisis, coordinar e informar sobre acciones de prevención y/o gestión de riesgos, analizar escenarios de desastre, compartir mapas de riesgo, registrar los medios organizados, y los recursos humanos y materiales disponibles, registrar y monitorear las tareas de prevención, educación y planificación y preparación, e informar y monitorear la ocurrencia de eventos adversos.
- **En la respuesta:** propagar alertas, poner en marcha protocolos de respuesta, facilitar la interoperabilidad de la información de distintas fuentes, permitir el seguimiento de las tareas de respuesta, fomentar la coordinación transversal mediante colaboración en línea y garantizar el acceso a una carta unificada de situación, mejorando así la calidad de la información para la toma de decisiones. Actualizar recursos humanos y materiales empeñados en la respuesta, y registrar y explotar información sobre donaciones y voluntarios ofrecidos.
- **En la recuperación:** permitir el análisis de la respuesta para mejorar los procedimientos aplicados, registrar y monitorear de las tareas de mitigación, rehabilitación y reconstrucción.

3.1 HERRAMIENTAS DEL SISTEMA CRISIS

A continuación, cuando se haga referencia a una capacidad de la aplicación no implementada aún, se la indicará como futura (f) y se limitará a aspectos que ya están proyectados para su inclusión.

- **Cartografía:** Permite la consulta e interoperación de información geográfica, construcción y difusión de mapas de riesgo, suscripción a la información geográfica externa, visualización de GeoRss (alertas con ubicación geográfica). En próximas etapas se permitirá monitoreo de flotas mediante livefeeds (f). Ver Figura 5.

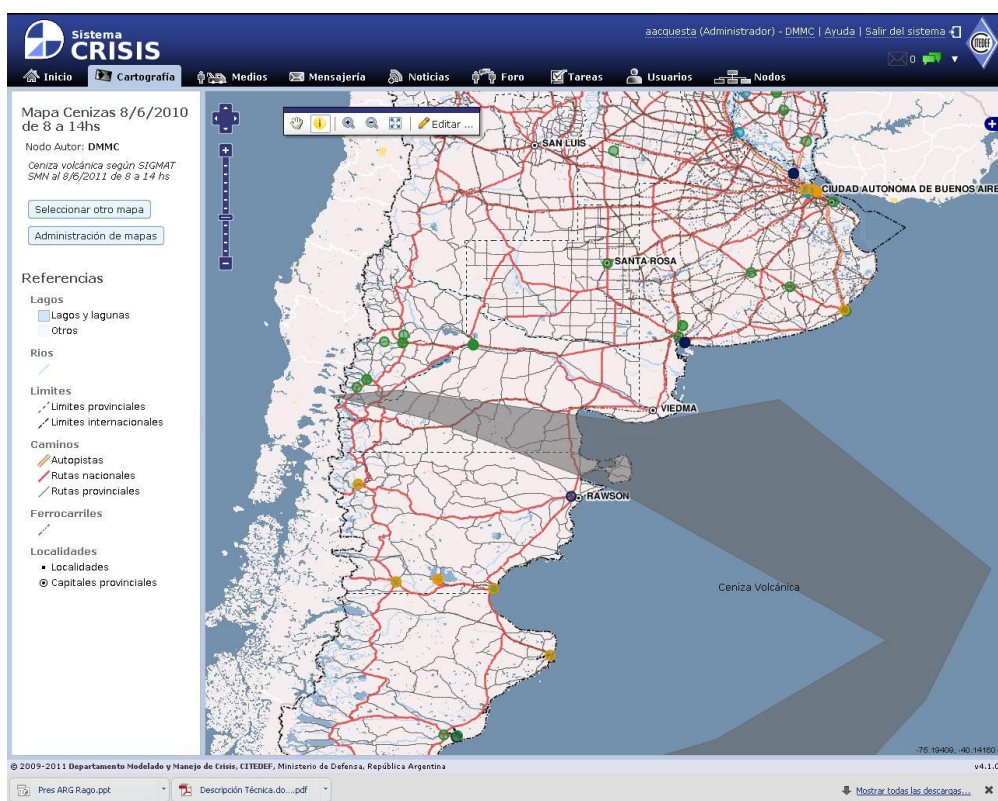


FIGURA 5: COMPONENTE DE CARTOGRAFÍA DEL SISTEMA CRISIS MOSTRANDO LA CENIZA VOLCÁNICA (SMN).
FUENTE: SISTEMA CRISIS, 2011.

- **Tareas:** Permite el registro, asignación y seguimiento de las actividades de respuesta, asociación de documentos a cada tarea, también puede monitorearse la historia de una tarea. Ver Figura 6.
- **Medios:** Permite registrar la organización interna de una institución, sosteniendo la localización, dependencia y responsable de los recursos humanos y materiales a disposición para las operaciones. Permite la búsqueda de recursos entre los propios y ajenos brindando su localización y dependencia, a fin de facilitar la gestión de operaciones multiagenciales. Ver Fig. 7 a 9.
- **Noticias:** Organiza la suscripción a fuentes de noticias y alertas sobre fenómenos usando RSS¹ y GeoRSS² pudiendo mostrar sobre la cartografía la ubicación asociada a

¹ RSS (*Really Simple Syndication*) es un sistema ideado para extraer la información que se actualiza con frecuencia, como noticias, mensajes de un foro o artículos de un blog, y usarla en otra web o en un programa. La principal ventaja de los RSS es poder reunir las noticias u otros contenidos de las webs y weblogs en un programa al que se llama agregador, y consultarlas de manera rápida.

cada entrada de un feed. Estas suscripciones son abiertas y cada nodo puede agregar las fuentes de información con las que habitualmente trabaja, compartirlas e incluso asociar fuentes propias de información (explotación de prensa, partes internos, blogs, etc.). Ver Fig. 10 y 11.

The screenshot displays the 'Sistema CRISIS' web application. The top navigation bar includes links for Inicio, Cartografía, Medios, Mensajería, Noticias, and Foro. The main content area is titled 'Listado de tareas' and features a table with columns: Numero, Nombre, Estado, Registrado, Registrante, Asignado, and Finalizado. The table lists various tasks, including 'Necesidad de potabilización', 'Solicitud de cocheros y cocina', 'Pedido de puente', 'Evacuación y Derrame Químico', 'Derrame químico, pedido de puente', 'Reconocimiento aéreo', 'Establecer comunicaciones y energía', 'Auxilio lesionados Pque La Vega', 'Instalación de 3 PMA 2 Gazebo', 'posibles emisiones toxicas', 'Derrame Químico en Aeroclub', 'Derrumbe en UNSA', 'Caida del Puente Wierna', 'Transito', 'Permitir acceso terrestre a la loc de La caldera', 'Derrumbe Edificio Pque La Vega', 'Colapso hospitalario', 'Aeropuerto inoperable', 'corte electrico, derrame químico, choques', 'Caida de árboles', 'auto atrapado', 'Derrame de Sustancias Químicas zona Aeroclub', and 'caída de estructura'. The task '3 - Derrame químico, pedido de puente' is highlighted in blue and is in 'En progreso' status. To the right of the table, a detailed view of this task is shown, including its description, assigned personnel (COMANDANTE ZONA EMERG NO), and a list of messages related to the task.

Numero	Nombre	Estado	Registrado	Registrante	Asignado	Finalizado
2	7 - Necesidad de potabilización	En progreso	28/09/2011	COE	COMANDANTE ZONA EMERG NO	---
3	6 - Solicitud de cocheros y cocina	Finalizada	28/09/2011	COE	COMANDANTE ZONA EMERG NO	29/09/2011
4	5 - Pedido de puente	Finalizada	28/09/2011	COE	COMANDANTE ZONA EMERG NO	29/09/2011
5	4 - Evacuación y Derrame Químico	En progreso	28/09/2011	COE	COMANDANTE ZONA EMERG NO	---
6	3 - Derrame químico, pedido de puente	En progreso	28/09/2011	COE	COMANDANTE ZONA EMERG NO	---
7	2 - Reconocimiento aéreo	Finalizada	28/09/2011	COE	COMANDANTE ZONA EMERG NO	28/09/2011
8	1 - Establecer comunicaciones y energía	Finalizada	28/09/2011	COE	COMANDANTE ZONA EMERG NO	28/09/2011
9	Auxilio lesionados Pque La Vega	Finalizada	28/09/2011	SAMEC	SAMEC	28/09/2011
10	Instalación de 3 PMA 2 Gazebo	En progreso	28/09/2011	SAMEC	SAMEC	---
11	posibles emisiones toxicas	Registrada	28/09/2011	COE	CRUZ ROJA	---
12	Derrame Químico en Aeroclub	Finalizada	28/09/2011	SAMEC	SAMEC	28/09/2011
13	Derrumbe en UNSA	Finalizada	28/09/2011	SAMEC	SAMEC	28/09/2011
14	Caida del Puente Wierna	Finalizada	28/09/2011	SAMEC	SAMEC	28/09/2011
15	Transito	En progreso	28/09/2011	POLICIA DE TRANSITO	COE	---
16	Permitir acceso terrestre a la loc de La caldera (requeriente EDESA)	Finalizada	28/09/2011	SERVICIOS PUBLICOS	COE	30/09/2011
17	Derrumbe Edificio Pque La Vega	Finalizada	28/09/2011	COE	BOMBEROS	29/09/2011
18	Colapso hospitalario	En progreso	28/09/2011	COE	SAMEC	---
19	Aeropuerto inoperable	Registrada	28/09/2011	COE	JEFE ESTADO MAYOR CZENO	---
20	corte electrico, derrame químico, choques	En progreso	28/09/2011	COE	POLICIA DE TRANSITO	---
21	Caida de árboles	Registrada	28/09/2011	EMERGENCIAS 911	COE	---
22	auto atrapado	En progreso	28/09/2011	COE	POLICIA DE TRANSITO	---
23	Derrame de Sustancias Químicas zona Aeroclub	En progreso	28/09/2011	SAMEC	COE	---
24	caída de estructura	Registrada	28/09/2011	EMERGENCIAS 911	COE	---

3 - Derrame químico, pedido de puente
En progreso

Sector Aeroclub: - Derrame de ácido sulfúrico. - Avenida Bolivia grietas y deterioros en el ingreso del Aeroclub - Puente sobre Río Uvienna

Colaboradores (Sin colaboradores)

Modificar Eliminar

Documentos de la tarea
No hay documentos asociados a la tarea.
Agregar documento

Mensajes

dmco-coe (COE), 28-09-2011 09:36
Cambio de estado: de Registrada a En progreso

dmco-czeno (COMANDANTE ZONA EMERG NO), 28-09-2011 10:28
- Análisis de la pluma de contaminación
- Solicitar evacuación a defensa civil. 1 hora
- Apoyo 8 Ing M 5: reparación Av. Bolivia
- No hay capacidad de reemplazo de Pte. Prever apoyo modo aéreo
- Solicitar volumen de transporte

em (COMANDANTE ZONA EMERG NO), 28-09-2011 03:28
Para abastecimiento de la localidad de LA CALDERA, se solicita oportunidad, volumen y peso de la carga.

em (COMANDANTE ZONA EMERG NO), 28-09-2011 03:51
En Sector Aeroclub operan elementos del 8 Ing 601 reforzados con un Elemento de tratamiento de sustancias químicas de la ARA.

em (COMANDANTE ZONA EMERG NO), 29-09-2011 10:00
Cambio de estado: de En progreso a Finalizada

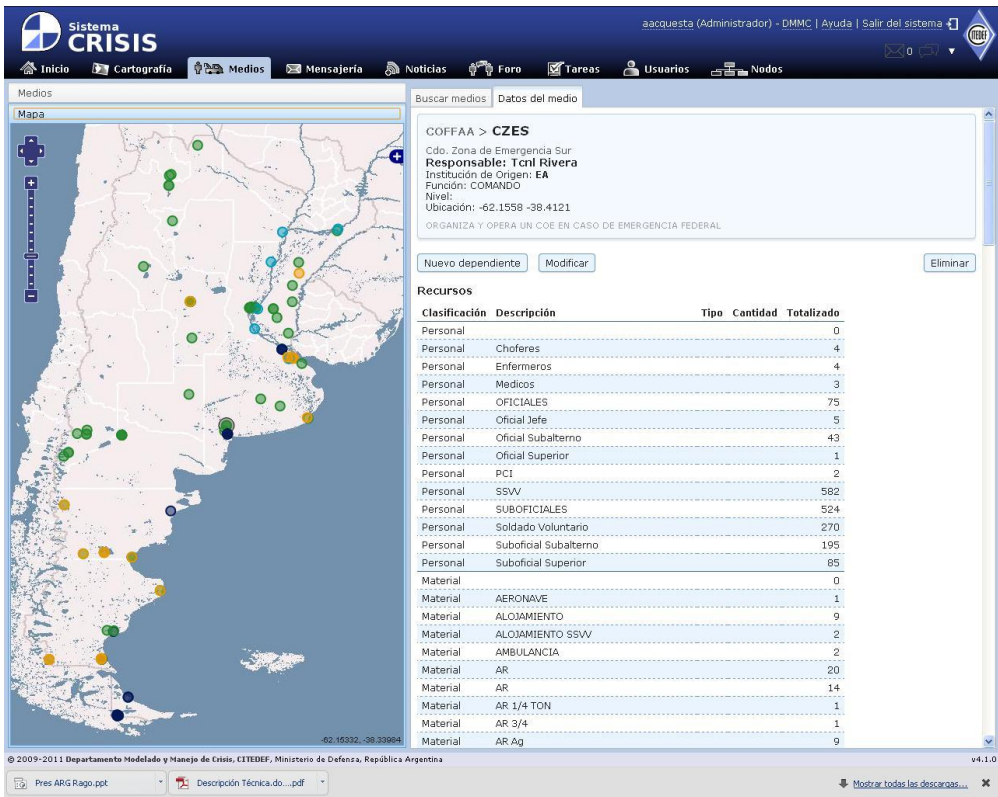
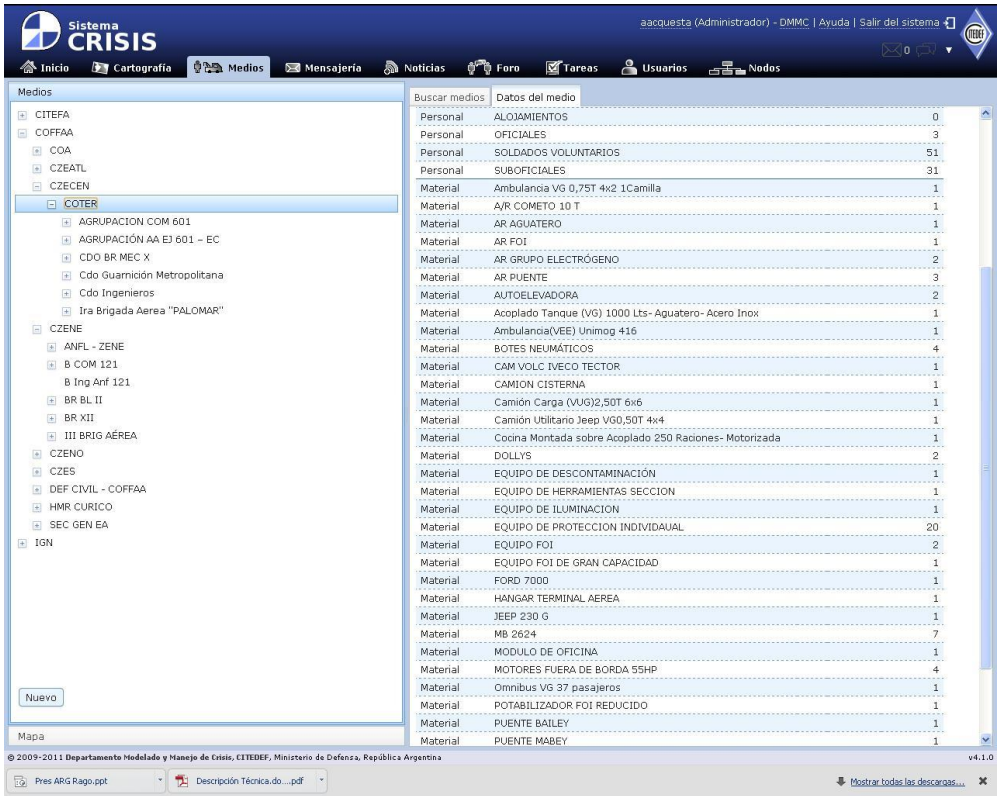
em (COMANDANTE ZONA EMERG NO), 29-09-2011 10:16
CZENO: Empleo de medios a la ORDEN RECIBIDA 8 Ing M 5: Remoción de Escombros, apuntalamiento de mampostería, rescate de heridos, Sección Perros / RIM 20: Búsqueda de personas

em (COMANDANTE ZONA EMERG NO), 29-09-2011 10:20

© 2009-2011 Departamento Modelado y Manejo de Crisis, CITEDEF, Ministerio de Defensa, República Argentina v4.1.0

FIGURA 6: COMPONENTE DE TAREAS DEL SISTEMA CRISIS - EJERCICIO INTEGRACIÓN 2011. FUENTE: SISTEMA CRISIS, 2011.

² GeoRSS es un conjunto de estándares para representar información geográfica mediante el uso de capas. El contenido consiste en puntos de interés georreferenciados y otras anotaciones, y las fuentes se diseñan para generar mapas.



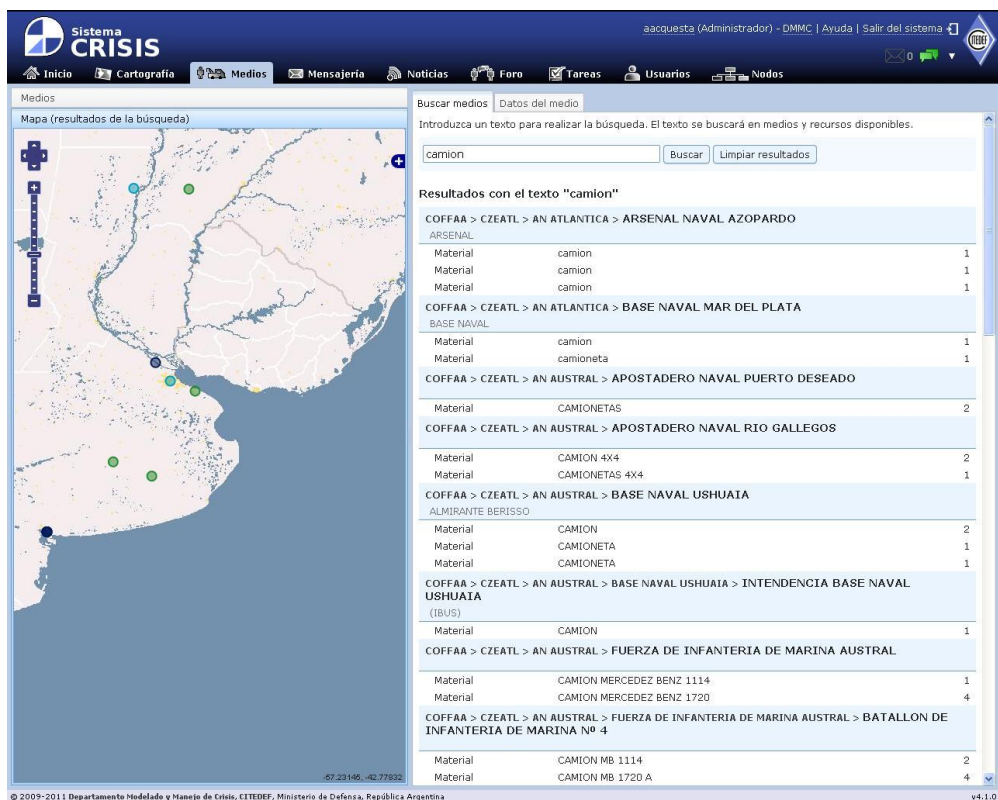


FIGURA 9: COMPONENTE DE MEDIOS DEL SISTEMA CRISIS. BÚSQUEDA DE RECURSOS SOBRE EL MAPA. FUENTE: SISTEMA CRISIS, 2011.

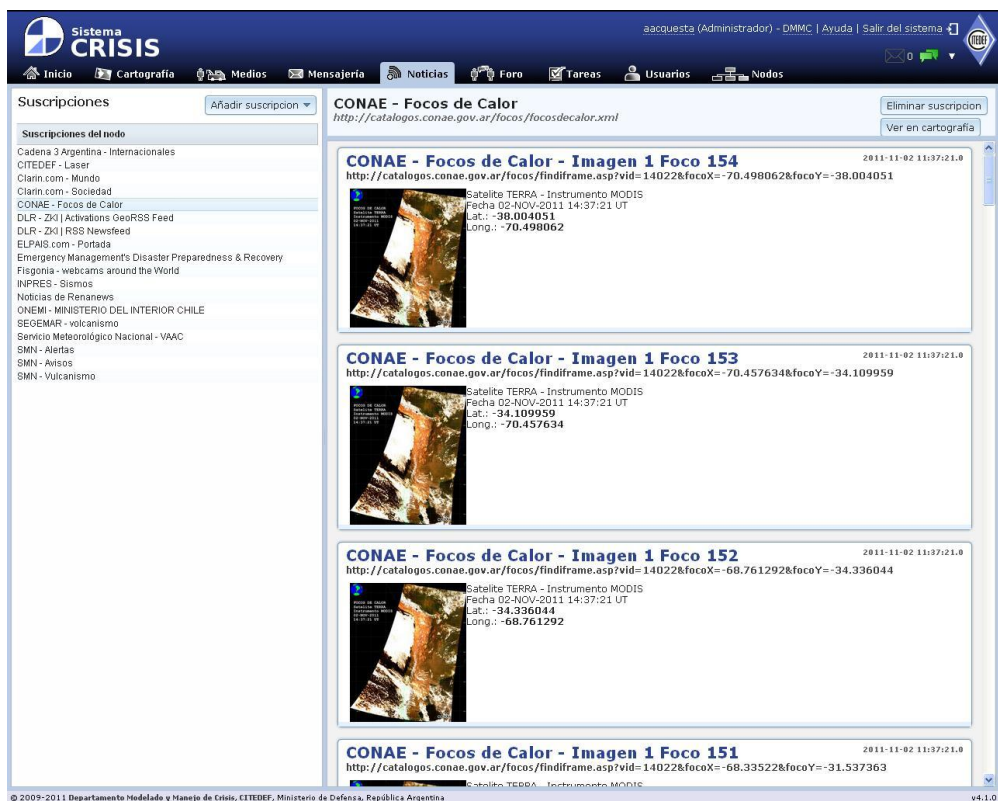


FIGURA 10: COMPONENTE DE NOTICIAS DEL SISTEMA CRISIS. LISTADO DE ALERTA DE FOCOS DE CALOR (CONAE). FUENTE: SISTEMA CRISIS, 2011.

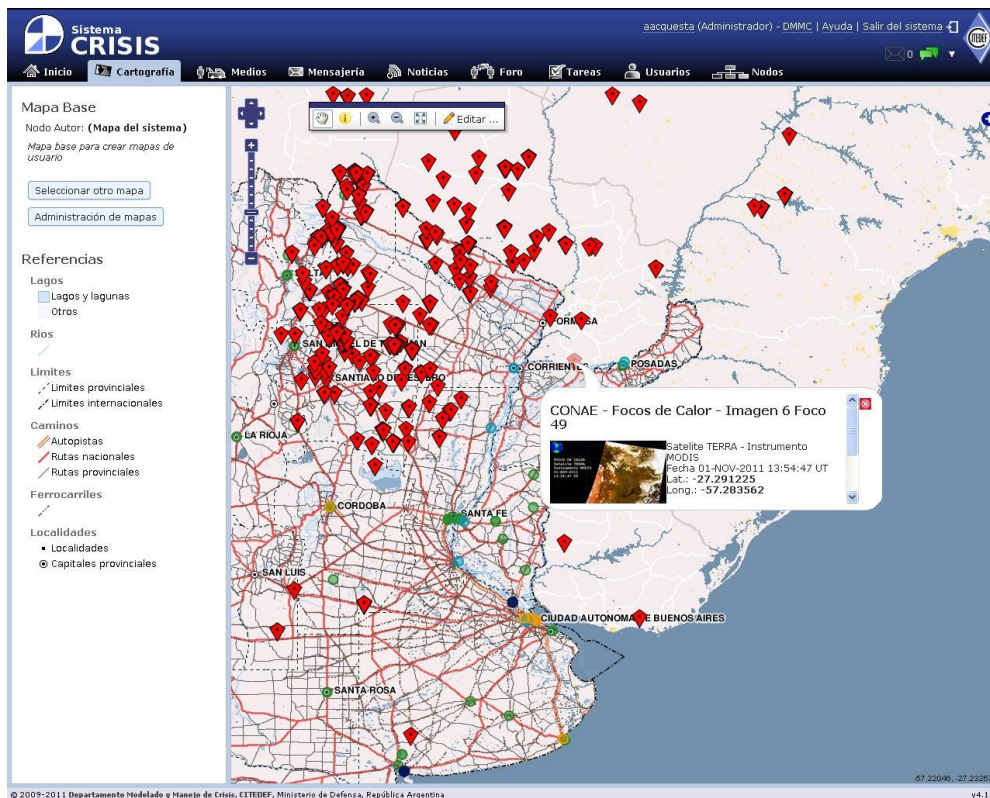


FIGURA 11: COMPONENTE DE NOTICIAS DEL SISTEMA CRISIS. VISTA SOBRE CARTOGRAFÍA DE ALERTAS DE FOCOS DE CALOR (CONAE). FUENTE: SISTEMA CRISIS, 2011.

- **Foro:** Permite la participación permanente de los nodos de la red para el asesoramiento, debate, respuesta y coordinación.
- **Mensajería:** Permite la comunicación escrita entre nodos de la red, conformando un mecanismo de coordinación interna efectiva, formal y libre de virus y spam.
- **Chat:** Permite la comunicación online e informal entre los usuarios del sistema, brindando acceso a la información de contacto de cada usuario.
- **Pizarra:** (En desarrollo) permitirá administrar una cartelera virtual asociada al nodo u oficina, de modo que se puedan colocar documentos estáticos y dinámicos a disposición de los usuarios del nodo, o de otros nodos, e incluso al alcance de la comunidad. De manera que sea sencillo dar recomendaciones a la comunidad, compartir información entre nodos, monitorear información que evoluciona dinámicamente (listas de evacuados, heridos, decesos, necesidades), acceder a información documental crítica desde cualquier lugar y evitar la proliferación de archivos enviados que obsoletan rápidamente.

- **Integración con modelos matemáticos:** Se trabaja sobre el supuesto de que el conocimiento de expertos sobre diferentes fenómenos puede sistematizarse para planificación de la respuesta, análisis de riesgos, realización de ejercicios y asistencia en la toma de decisiones durante una emergencia. Para cumplir con estos requerimientos, los modelos deben:
- Utilizar información geográfica y/o tabular sin mayores modificaciones.
- Brindar su resultado cuantificando los efectos potenciales del fenómeno sobre las personas, bienes, infraestructura y medio ambiente de manera geográfica y en formato estándar.
- Obtener resultados con tiempos pequeños de simulación, resulta de gran utilidad para la respuesta a emergencias en tiempo real. Recordemos que hay un compromiso entre el nivel de detalle de un modelo y el tiempo de simulación, en consecuencia los modelos que proporcionen un gran detalle del fenómeno serán de gran utilidad para la etapa de planificación.
- Evaluar perturbaciones durante su ejecución, a fin de tener en cuenta los cambios en las condiciones atmosféricas y los efectos de las intervenciones de control, entre otros.
- Ofrecer una comprensión más acabada de los escenarios a estudiar y, de este modo, una protección más eficiente de la salud de la población afectada, el ambiente y los bienes involucrados.

El Sistema CRISIS y los modelos de simulación pueden actuar en forma acoplada (f) o independiente. Se pretende a través de esta interacción: versatilidad, simpleza y optimización de las metodologías actuales.

El Sistema CRISIS y sus modelos matemáticos están permanentemente en desarrollo, las nuevas funcionalidades se van incorporando a medida que los usuarios identifican nuevas necesidades y el tiempo y los recursos lo permiten. Esta característica ha tenido un efecto positivo en la maduración de la herramienta, que ha sido un proceso continuo desde 2003 hasta la fecha.

4 OBJETIVOS

La **planificación en emergencias** y desastres constituye un gran pilar en la gestión y el manejo de las mismas, mientras que los primeros momentos en la **respuesta a emergencias** suelen ser los de mayor incertidumbre y los más decisivos a la hora de salvar vidas y bienes. Ante diferentes realidades, los modelos matemáticos que simulen adecuadamente el fenómeno en cuestión constituyen herramientas de gran utilidad para la toma de decisiones.

La necesidad y utilidad de modelos predictivos, adecuados al contexto en el que vivimos, fue lo que impulsó al desarrollo de esta tesis en el marco del proyecto CRISIS. La carencia de bases de datos en nuestro país hace difícil o limitada la aplicación de modelos, sólo salvable a través de aproximaciones o simplificaciones que de todas maneras introducen factores de error considerables. Por otra parte, es de esperar que un país en vías de desarrollo como el nuestro disponga de recursos limitados para la gestión; por tal motivo toda mejora y optimización que contribuya a la menor sobreestimación por parte de los modelos de interés contribuirá directamente a una respuesta más eficiente frente a una emergencia.

De acuerdo a lo mencionado hasta aquí, es objetivo de esta tesis el desarrollo de una herramienta de mayor ductilidad, para el manejo de emergencia químicas, de modo de quitarle rigidez al sistema actual. A tal fin se recurre a la formulación, implementación y acoplamiento de un modelo de exposición aguda a una nube tóxica con diferentes modelos de distribución de contaminantes en aire, para su aplicación en emergencias químicas. Se pretende que el modelo de exposición aguda evalúe los efectos potenciales sobre la población expuesta a la nube tóxica en forma progresiva y dinámica, de modo que acoplado a cualquier modelo de distribución de contaminantes en aire, que ofrezca una salida temporal de sus datos, pueda representar escenarios de desastre con dinamismo sin faltar a la exactitud y a la precisión. La originalidad de los modelos desarrollados se corresponde con la temporalidad del procesamiento de los datos y de la salida para cualquier etapa de la gestión de riesgos: planificación o respuesta. De este modo, los decisores pueden contar con una estimación más detallada y dinámica de la distribución del contaminante en el incidente químico, y de las regiones de afectación, ofreciendo un mejor conocimiento de la situación y del tiempo disponible para la intervención oportuna.

En este capítulo se ha pretendido dar un enfoque descriptivo de la situación actual del manejo de emergencias en nuestro país en base al código internacional. Se ha recurrido así a la

presentación del Sistema CRISIS como plataforma informática para la gestión y el entrenamiento a emergencias, como proyecto marco de esta tesis.

Por lo expuesto en el capítulo I, y enfatizando en las debilidades y necesidades del sistema actual de gestión y manejo de emergencias, se desarrolla en el capítulo II un modelo de exposición aguda, DDC (*Damage Differential Coupling*), aplicable a situaciones de emergencias químicas. A través de este modelo se busca optimizar la forma de estimar cuali y cuantitativamente la población afectada por una nube tóxica, de modo de permitir un enfoque más descriptivo y preciso que otras metodologías de uso corriente, mediante el monitoreo continuo del nivel de daño estimado, contribuyendo así a un mejor análisis de los escenarios.

En el capítulo III se formulará, resolverá e implementará un modelo simple de distribución de contaminantes en el aire, no estacionario, con término de reacción de primer orden de la especie química en el medio de propagación con inclusión de un término fuente, aplicable a situaciones de respuesta a emergencias. Este modelo simple, junto a un modelo más complejo como lo es el CFD (*Computational Fluid Dynamics*), FLACS (*FLame Acceleration Simulator*), y a un modelo de gases densos, se acoplarán en el capítulo IV con DDC para mostrar la modularidad de este último, logrando de este modo una aplicación versátil en todas las etapas de la gestión integral de emergencias.

Entendemos que es una necesidad para la sociedad pasar de la actual situación artesanal-burocrática a un modelo de gestión y toma de decisiones que, frente a una emergencia, pueda ofrecer una protección completa de la salud de la población afectada, el ambiente y los bienes involucrados. En tal sentido, enfatizamos en la necesidad de disponer de una herramienta para la adecuada toma de decisiones, minimizando la confusión, los rumores y la exageración.

CAPÍTULO II

ESTRATEGIAS DE EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN

1 INTRODUCCIÓN

La concentración del tóxico dentro del organismo cambia con el tiempo; tan pronto como entra un tóxico al cuerpo se inicia el proceso de eliminación, por lo que su concentración disminuirá con el tiempo. Recurriremos a un conocido ejemplo para explicar esta situación: si se consume una cantidad grande de alcohol en un tiempo corto, la concentración del mismo en los órganos de desintoxicación, en este caso el hígado, será muy alta. Si bien la eliminación de la sustancia se inicia de inmediato, la magnitud de la ingestión no da tiempo para reducir la concentración de alcohol en sangre, y de este modo el alcohol alcanzará al cerebro. Cuando se ingiere la misma cantidad, pero lentamente, se le da más tiempo al organismo para eliminar el alcohol, llegando de este modo una cantidad baja al cerebro y con efectos, en consecuencia, mucho menores que la situación anterior.

1.1 DEFINICIÓN DE CONCEPTOS BÁSICOS

Si bien la evaluación de una exposición aguda, como es la que compete a una situación de emergencia química, sienta bases en simplificaciones, se considera de importancia mencionar términos básicos ⁽¹¹⁾ que se refieren a la toxicología ambiental con una breve explicación.

1.1.1 XENOBIÓTICO

Cualquier sustancia que no ha sido producida por la biota, tales como los productos industriales, drogas terapéuticas, aditivos de alimentos, compuestos inorgánicos, etc.

1.1.2 TÓXICO

Xenobiótico que produce efectos adversos en los organismos vivos.

1.1.3 EXPOSICIÓN

Contacto de una población o individuo con un agente químico o físico. La magnitud de la exposición se determina midiendo o estimando la cantidad (concentración) del agente que está presente en la superficie de contacto (pulmones, intestino, piel, etc.) durante un período especificado.

1.1.4 RUTA DE EXPOSICIÓN

Es el camino que sigue un agente químico en el ambiente desde el lugar donde se emite hasta que llega a establecer contacto con la población o individuo expuesto. El análisis de la **ruta de exposición** describe la relación que existe entre las fuentes (localizaciones y tipo de derrames ambientales) y los receptores (localización de las poblaciones, patrones de actividad, etc.). Se consideran como rutas significativas las que dan lugar a exposición humana.

1.1.5 EFECTO TÓXICO

Se define como **efecto tóxico** o respuesta tóxica, a cualquier desviación del funcionamiento normal del organismo que ha sido producida por la exposición a sustancias tóxicas. Sólo se consideran como desviaciones significativas los cambios irreversibles o los cambios que permanecen por un período prolongado después de que la exposición ha cesado.

El tipo de efecto tóxico que produce una sustancia sirve para hacer una clasificación muy general: cancerígenos, no-cancerígenos y tóxicos para el desarrollo.

1.1.6 TOXICOLOGÍA AMBIENTAL

La **toxicología ambiental** estudia los daños causados al organismo por la exposición a los tóxicos que se encuentran en el medio ambiente. El objetivo principal de la toxicología ambiental es evaluar los impactos que producen en la salud pública la exposición de la población a los tóxicos ambientales presentes en un sitio contaminado. Es conveniente recalcar que se estudian los efectos sobre los humanos, aunque pudieran existir, en el sitio de estudio, otros blancos de los tóxicos tales como microorganismos, plantas, animales, etc.

1.1.7 CARGA TÓXICA (L)

La carga tóxica constituye la base de la evaluación toxicológica. La toxicidad expresada para una determinada sustancia en el aire se ve influenciada por dos factores, la concentración en el aire (C) y la duración de la exposición (t_{exp}). La relación funcional entre C y t_{exp} , en donde el producto final de esta relación es una constante: $f(c, t) = \text{constante}$, se conoce como carga tóxica.

1.1.8 DOSIS Y DOSAJE

La dosis de exposición está definida por la cantidad de sustancia a la que se expone el organismo y el tiempo durante el que estuvo expuesto. La dosis determina el tipo y magnitud de la respuesta biológica y éste es un concepto central de la toxicología.

La relación entre el tipo de respuesta y la dosis suministrada fue analizada desde los tiempos de Paracelsus, quien en 1493 expresó que todos los remedios son venenos y la diferencia entre remedio y veneno es la dosis correcta.

El **dosaje** ($\text{mg} \cdot \text{min} \cdot \text{m}^{-3}$) se define como la integral temporal de la concentración y es también conocido como la exposición acumulada, no debe ser confundido con el término **dosis** (mg de químico. Kg^{-1} de masa corporal). Este último mide la masa del xenobiótico tomada por el cuerpo.

1.1.9 PELIGRO Y RIESGO

El término “peligroso” define la capacidad de una sustancia de producir efectos adversos en los organismos, y el término “riesgo” describe la probabilidad de que, en una situación dada, una sustancia peligrosa produzca un daño. Se dice que una persona se puso en “riesgo” cuando está “expuesta” a un “peligro” y la magnitud del riesgo es una función tanto de la peligrosidad de la sustancia como de la magnitud de la exposición, si alguno de ellos es igual a cero entonces no hay riesgo.

Aunque la exposición efectiva sea la que recibe el órgano blanco, de todas maneras, en la evaluación de riesgos ambientales, la dosis suministrada se expresa en función de la concentración en el medio contaminado que entra en contacto con el organismo receptor. Este dato es un resultado del muestreo ambiental.

1.1.10 INTERACCIONES QUÍMICAS

La toxicidad de una sustancia se puede incrementar o disminuir por la exposición simultánea o consecutiva con otra sustancia. Los efectos combinados pueden ser aditivos, sinérgicos, potenciadores o antagonistas. Por tanto, pueden producir una simple **respuesta aditiva**, la cual es la suma de las dos respuestas individuales. Puede manifestarse una **respuesta sinérgica**, la cual es mayor que la esperada por la adición de las respuestas individuales. De otro modo, puede ser **potenciante**, ocurriendo que una sustancia que no es tóxica en un determinado órgano blanco se vuelva mucho más tóxica cuando se agrega otra, o **antagónica**, interfiriendo mutuamente en sus acciones o una interfiere con la acción de la otra.

1.1.11 ESCENARIO DE EXPOSICIÓN

El área física que comprende el lugar donde se derraman o emiten los tóxicos al ambiente, donde se transportan y donde las poblaciones entran en contacto con los medios contaminados recibe el nombre de escenario de exposición.

El sitio se describe en función de las variables que puedan tener influencia sobre la movilidad de los tóxicos y los niveles de contaminación. Las variables físicas y químicas que se evalúan son las que se utilizan para alimentar los modelos de transporte y destino y estimar el daño potencial sobre la población expuesta.

En la descripción de las poblaciones se consideran los asentamientos humanos dentro del sitio y sus cercanías, así como los que pudieran quedar expuestos en el futuro, aunque se encuentren localizados en sitios alejados de la fuente de contaminación. En lo referente a la localización de los asentamientos humanos, la información más importante es su posición relativa con respecto a la fuente de contaminación y a la dirección de los desplazamientos más probables de los tóxicos.

2 ANÁLISIS DE METODOLOGÍAS VIGENTES PARA LA ESTIMACIÓN DEL NIVEL DE DAÑO ANTE EXPOSICIONES AGUDAS

Las metodologías de uso frecuente para la evaluación de riesgos y gestión en emergencias, relativas a la exposición aguda a sustancias peligrosas (llámese exposiciones agudas a aquellas

de características individuales, no repetitivas y que no exceden de 8 horas ⁽¹²⁾), consisten básicamente de dos partes: un modelo para la liberación y transporte de sustancias químicas tóxicas (MT), y una representación de las áreas de riesgo (RAR). Estas dos partes se conjugan por medio de algún método que, para cada ubicación donde la nube tóxica pasa, analiza el perfil de concentración (salida de modelo de transporte) y se asocia con alguna concentración de referencia de alerta (LOC) para así identificar las áreas de riesgo.

LOC es el valor por encima del cual la concentración de gases tóxicos podría ser lo suficientemente grande como para dañar a las personas. ⁽¹¹⁾

En la actualidad es una práctica común emplear una jerarquía de índices toxicológicos, como LOCs, para la exposición a diferentes sustancias químicas en el aire. Para la estimación del daño provocado por exposiciones agudas, los índices de preferencia son los AEGL (*Acute Exposure Guideline Levels*). Cuando la sustancia no dispone de AEGL se recomienda utilizar el índice ERPG (*Emergency Response Planning Guidelines*) y en última instancia puede ser utilizado el índice TEEL (*Temporary Emergency Exposure Limits*). ⁽¹³⁻¹⁷⁾

Los AEGLs representan límites umbrales de exposición, para el público en general, y son aplicables a los períodos de exposición de emergencia que van desde 10 minutos a 8 horas. Los procedimientos operativos de los AEGLs, definen a este índice como la concentración en el aire (expresada en ppm o mg m^{-3}) de una sustancia por encima de la cual se prevé que la población general, incluyendo individuos susceptibles, podría experimentar diferentes síntomas. Tres niveles diferentes de referencia se establecen y se corresponden con aumentos en la severidad de los síntomas (AEGL-1, AEGL-2 y AEGL-3). ^(14, 18) Los múltiples períodos disponibles para cada nivel de daño permiten una interpolación fiable a diferentes tiempos. Los AEGLs han sido publicados para varias sustancias químicas. A través del sitio Web de la EPA se puede acceder al estado actual de este proyecto. ⁽¹⁹⁻³⁰⁾

Entre los programas que aplican a escenarios de accidentes químicos y que hacen uso de un MT y de una RAR, ALOHA (Areal LOcations of Hazardous Atmospheres) es uno de los más populares y convenientes ya que está disponible en Internet de forma gratuita. ⁽³¹⁾ ALOHA puede modelar la dispersión de una nube de contaminantes en la atmósfera y representar una vista aérea de las regiones de afectación, las cuales predecirán los diferentes niveles de amenaza.

En ALOHA, cuando se modela una descarga de sustancias químicas, se puede elegir como LOC a los valores de los AEGLs, si es que se encuentran definidos para la especie química en

cuestión. A pesar de que los AEGLs están disponibles para cinco tiempos de exposición, sólo los AEGL para 60 minutos son utilizados por ALOHA. Esto se debe a que ALOHA, por el uso de modelos estacionarios, sólo modela la dispersión para los 60 minutos posteriores desde su liberación. Este software define, entonces, el nivel de daño causado por la concentración máxima observada durante el tiempo total de exposición, para cada posición geográfica analizada. Cada vez que la concentración máxima observada en un lugar determinado sea mayor que un particular LOC, aunque sea por un pequeño instante, esa ubicación representará un riesgo que estará caracterizado por el LOC. Hay que señalar que el programa ALOHA utiliza estos LOC como niveles de concentración constante. ^(11, 30-32)

En España, por otro lado, la nueva "Directriz Básica de Protección Civil para el Control y Planificación ante el Riesgo de Accidentes Graves en los que intervienen Sustancias Peligrosas" utiliza un método popular para la determinación de las diferentes áreas de planificación en caso de accidente, de ahora en adelante llamado método español. Este método utiliza los perfiles de concentración obtenidos a partir de algún MT. No sólo este método utiliza los tiempos de referencia para cada nivel de daño AEGL, sino que además utiliza una representación tiempo-concentración de los índices AEGL, ERPG o TEEL, donde los valores se extienden a tiempos distintos a los de referencia, a través de interpolaciones y extrapolaciones adecuadas. Para la determinación de las diferentes áreas de planificación, el método español se basa en los tiempos de paso de la nube y en las concentraciones máximas asociadas a los perfiles observados a diferentes distancias de la liberación de sustancias químicas tóxicas. Para delinear la nube tóxica se determina un umbral de concentración mínima. El tiempo total de paso de la nube se define como el período durante el cual la concentración del perfil es mayor que el umbral de concentración mínima. Los pares formados por cada tiempo de paso de la nube y su correspondiente concentración máxima se representan en el mismo diagrama que los pares de concentración-tiempo para los dos niveles de daño (nivel 1 y nivel 2) del índice disponible (AEGL, ERPG o TEEL), obteniendo dos puntos de intersección (ver Figura 12) que va a determinar los valores (concentración y tiempo total de exposición) para definir las distancias de **intervención** y **alerta**. Las concentraciones que caracterizan a las áreas de intervención y de alerta son introducidas en un software, determinando así las distancias máximas en donde esas concentraciones serán alcanzadas. ⁽¹³⁾

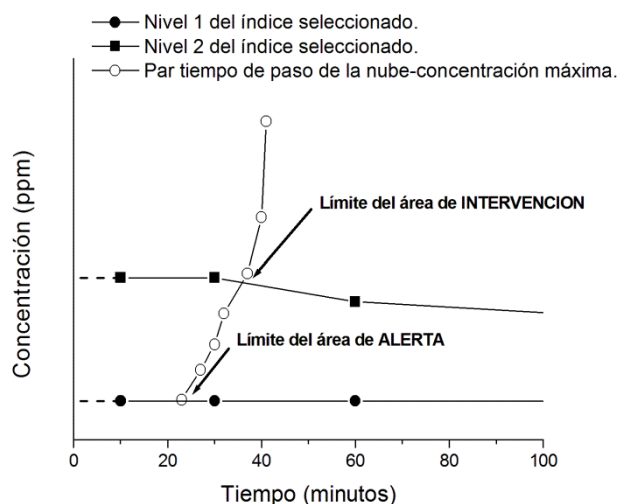


FIGURA 12: REPRESENTACIÓN GENÉRICA DE LOS NIVELES 1 Y 2 DE LOS ÍNDICES DISPONIBLES (AEGL EN ESTE CASO) Y UNA GRÁFICA TÍPICA OBTENIDA POR UNIR LOS PARES TIEMPO- CONCENTRACIÓN (PARES DE TIEMPO DE PASO DE LA NUBE Y DE CONCENTRACIÓN MÁXIMA). LOS PUNTOS DE INTERSECCIÓN DETERMINAN LOS VALORES CARACTERÍSTICOS (CONCENTRACIÓN Y TIEMPOS DE EXPOSICIÓN) PARA DEFINIR LAS DISTANCIAS PARA LAS ÁREAS DE INTERVENCIÓN Y ALERTA.

La diferencia entre el ALOHA y el método español es que el primero utiliza el tiempo de simulación total (60 minutos), mientras que el segundo usa sólo el tiempo en el cual la concentración superó al umbral. Por otra parte, el método español utiliza los cinco tiempos de exposición disponibles para el AEGL, mientras que el ALOHA sólo utiliza los AEGLs para 60 min. Por último, ambos usan la misma concentración (la máxima).

No es nuestra intención evaluar los MT o las RAR disponibles; sin embargo, se analizarán a continuación algunas de las limitaciones observadas en los métodos que usan esas herramientas y así estableceremos los objetivos para desarrollar un modelo de exposición optimizado:

- **Aproximación del perfil de concentración variable en el tiempo a uno constante,** con una concentración igual a la máxima durante el tiempo de exposición considerado: por lo general lleva a una sobreestimación del nivel de daño, que dependerá del grado de variabilidad del perfil analizado. Esta aproximación conservadora para el cálculo se basa en la metodología seguida para la determinación de los niveles guía, en la cual la concentración de la exposición permanece constante durante todo el período de análisis. ^(13, 32)

- **Los métodos actuales no proporcionan información sobre la evolución del daño en función del tiempo.** Sólo la situación final es dada. Este hecho no permite una planificación oportuna de las acciones de respuesta durante el paso de la nube.
- **Los métodos actuales no proporcionan información sobre el nivel de daño mínimo esperado.** Teniendo en cuenta que el nivel de daño evaluado es mucho mayor que el real, sería útil proporcionar a los responsables en la gestión de emergencias un intervalo de estimación que asegure contener al valor de daño esperado.
- **Los métodos actuales no cuantifican la severidad entre dos curvas dato de isodaño³.** Sin tener en cuenta la proximidad de los pares tiempo-concentración a las curvas dato de isodaño, sólo un valor entero del daño es proporcionado por los métodos vigentes.

Todos estos factores pueden conducir a acciones inadecuadas de los responsables en la gestión de emergencias, quienes podrían descartar ciertas intervenciones considerándolas inútiles e inoportunas, mientras que tal vez podrían todavía llevarlas a cabo con resultados positivos, e incluso salvando vidas.

En este capítulo se desarrolla un método denominado **DDC** para estimar un rango de daño que puede experimentar una población cuando se expone a una concentración variable en el tiempo, utilizando los mismos índices toxicológicos que emplean los métodos vigentes, pero de un modo progresivo y más preciso que ellos. Consideramos que disponer de estas ventajas es fundamental para una gestión adecuada en una emergencia.

3 METODOLOGÍA

Como bien se mencionó, **DDC** obtiene una estimación progresiva del daño experimentado mientras las personas están expuestas a los químicos, permitiendo además la estimación del nivel de daño máximo y mínimo que resulta de la exposición. Para tal fin, **DDC** hace uso de los índices toxicológicos y de los perfiles de concentración variables en el tiempo como herramientas para la estimación del daño. Asimismo asume que hay un campo continuo en

³ *Curvas dato de isodaño*: Definiremos al conjunto de curvas continuas que unen los puntos relacionados con el mismo nivel de daño para los datos definidos por tabla.

tiempo y concentración de los índices toxicológicos, y que el cálculo incremental del daño por medio de los diferenciales de exposición (*acoplamiento*) es no conmutativo. En la esta sección se explicarán los supuestos sobre los que se funda DDC, y las herramientas de las cuales hace uso.

3.1 ÍNDICES TOXICOLÓGICOS

El tiempo equivalente de exposición a una nube tóxica rara vez será igual a uno de los cinco períodos de tiempo para los cuales los AEGLs están definidos (10 min, 30 min, 1 h, 4 h, 8 h) y la EPA, por su parte, no ofrece una guía explícita sobre cómo determinar los valores de AEGL para tiempos comprendidos entre los tiempos definidos. Aun así, existen métodos de interpolación como el que propone Stage en su trabajo, ⁽¹⁸⁾ sin embargo en esta tesis se ha decidido aplicar la relación entre la concentración y el tiempo, seguida en el propio desarrollo de los AEGL: ^(14, 18, 34-43)

- En aquellos casos en donde la respuesta a la nube tóxica puede considerarse como una concentración umbral e independiente del tiempo, se puede utilizar el mismo valor de daño para todo el período. Tal situación la representan los irritantes en el nivel AEGL-1.
- Las extrapolaciones que incluyen datos derivados de un par tiempo- concentración a otro se puede estimar con la regla de Haber, que establece que el producto de la concentración y el tiempo de exposición es igual a una constante (carga tóxica igual a una constante). Esta relación parece ser aplicable principalmente a intervalos cortos y a especies químicas que actúan directamente, tales como el cloruro de hidrógeno y el Dibutil Hexametildiamina:

$$L = C * t_{\text{exp}} .$$

- Ten Berge evaluó la relación anterior y concluyó que sería más general con el producto de la concentración a la enésima potencia y el tiempo igual a una constante (carga tóxica igual a la constante):

$$L = C^n * t_{\text{exp}} .$$

Para una amplia gama de gases industriales, n toma valores entre 1 y 3.5, y los valores más comunes de n están comprendidos entre 2 y 3. El amoníaco es un ejemplo que cumple esta relación con $n = 2$.

En particular, para tiempos inferiores a 10 minutos, se puede suponer que el daño no depende del tiempo de exposición sino más bien de la concentración, es decir, se supone que en esos casos las personas están expuestas a la misma concentración durante el tiempo completo. Esta aproximación conservativa garantiza que el daño causado a las personas debido a un par tiempo-concentración obtenido nunca será mayor que uno definido por el nivel de daño considerado. ⁽¹³⁾

Por otro lado, los índices ERPG y TEEL proporcionan sólo un par tiempo-concentración. Si no hay información toxicológica adicional disponible, la extrapolación de los índices se lleva a cabo utilizando los mismos criterios que para los AEGLs. Una discusión completa de la interpolación de estos índices está dada por González Ferradás. ⁽¹³⁾

La Figura 13 muestra una representación gráfica de los índices con las interpolaciones y extrapolaciones anteriores.

3.2 PERFILES

Un perfil describe los valores de concentración observados, durante el paso de la nube, en una ubicación geográfica determinada.

Para delinear la nube tóxica y optimizar el costo computacional se dará por sentado que una concentración umbral mínimo existe, por encima del cual la sustancia es percibida por cualquiera de los sentidos.

Ha habido intentos para tratar a los perfiles de concentración variable en el tiempo mediante la simplificación de las series de tiempo fluctuantes. La variabilidad aleatoria en la concentración de químicos en el aire, sobre el tiempo y el espacio, puede conducir a incertezas en la estimación del tamaño de las áreas potencialmente afectadas por el uso de los AEGLs, ampliamente utilizados como umbral. ⁽⁴⁴⁻⁴⁶⁾

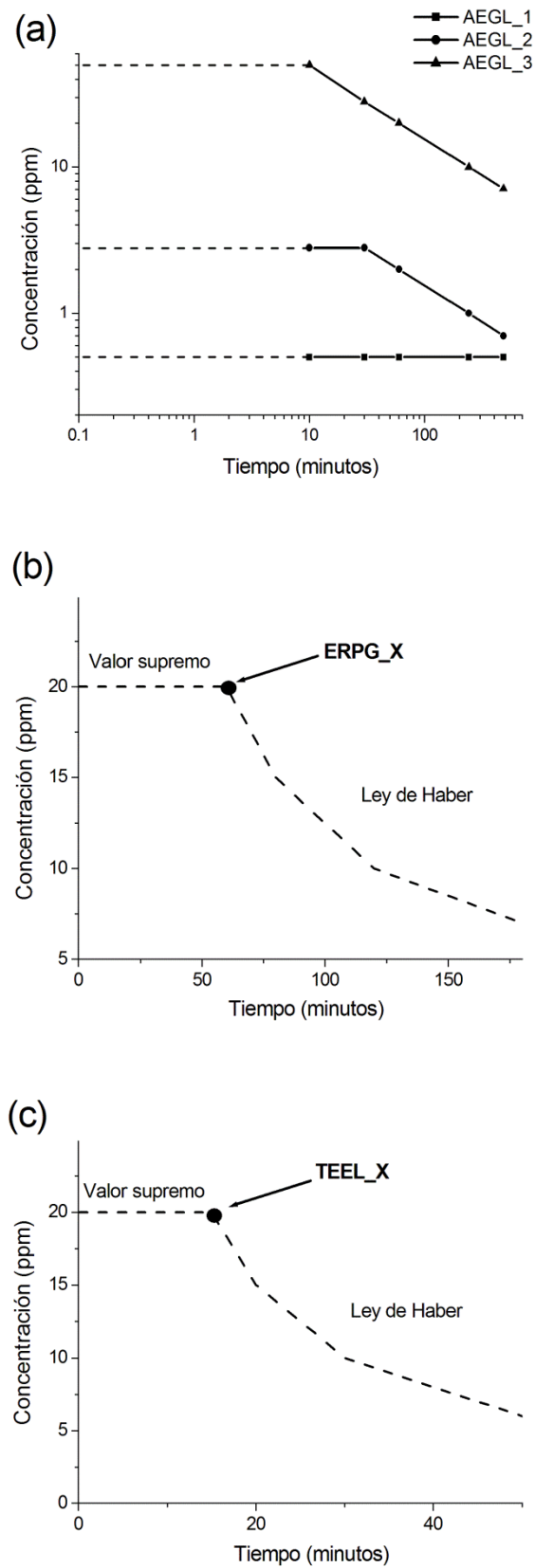


FIGURA 13: (A) REPRESENTACIÓN DE LAS CURVAS DATO DE ISODAÑO CORRESPONDIENTE A LOS TRES NIVELES DE LOS AEGLS PARA EL CLORO. EN (B) Y EN (C) SE MUESTRAN LAS EXTRAPOLACIONES APLICABLES A LOS ERPGS Y A LOS TEELS, RESPECTIVAMENTE.

En nuestro método, cualquier perfil se puede aproximar por la descomposición en pares $(\Delta t, \bar{C})$ de tal manera que su suma es una aproximación a la integral del perfil. Por lo tanto, la exposición (E) se puede calcular como

$$E = \int_0^{t_{exp}} C \cdot dt \approx \sum_{i=1}^n \bar{C} \cdot \Delta t,$$

donde

$$\bar{C} = \frac{C_i + C_{i-1}}{2},$$

con C_{i-1} = concentración observada para el punto final más bajo del intervalo Δt ,

y C_i = concentración observada para el punto final mayor del intervalo Δt .

3.3 EXISTENCIA DE UN CAMPO CONTINUO

Un campo continuo de curvas de isodaño se representa entre el nivel 3 de la curva dato de isodaño y la curva de umbral mínimo (asociado a un nivel de daño 0), trazado de acuerdo con los valores establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. ⁽⁴⁷⁾ Por lo tanto, siempre hay una curva de isodaño asociada a cualquier par (t, C) , siempre y cuando la concentración sea mayor o igual a la concentración umbral para ese momento. Para estimar el valor del daño asociado a un par (t, C) se define una función para el nivel de daño. Su dominio es el producto cartesiano del intervalo $(0, 8]$ (izquierda abierto-derecha cerrado) por el conjunto de números reales positivos. El intervalo $(0, 8]$ incluye todos los tiempos de exposición probables (en horas), y el conjunto de números reales positivos, a las concentraciones posibles, medidas en ppm o mg m^{-3} . La imagen de la función nivel de daño es el conjunto de todos los números entre (e incluyendo) 0 y 3. Por lo tanto, si ponemos $\Omega = (0, 8] \times \mathbb{R}^+$ definimos una función $D(t, C)$ tal que $D: \Omega \rightarrow [0, 3]$.

La exposición a sustancias tóxicas puede tener períodos donde el nivel de daño se asocia con el tiempo de exposición de forma dependiente o independiente. Por esta razón, es necesario distinguir dos tipos de interpolación vertical, en función del tipo de curva dato de isodaño: inmediatamente por encima del par $(CDIE)$ ó inmediatamente por debajo del par $(CDID)$.

Llamaremos n_{CDIE} y n_{CDID} a los exponentes característicos de $CDIE$ y $CDID$, respectivamente, donde n es el exponente de la ecuación de ten Berge.

- Si tanto la $CDIE$ y la $CDID$ son dependientes del tiempo, entonces el nivel de daño es interpolado desde el valor de L ,

$$D(t, C) = D(t, C_{CDID}) + \frac{(C^n \cdot t - L_{CDID})}{(L_{CDIE} - L_{CDID})},$$

donde

C_{CDID} es la concentración que causa un daño equivalente a la de $CDID$ en un tiempo t ,

L_{CDID} es la carga tóxica para la curva dato de isodaño inmediatamente por debajo del par (t, C) ,

L_{CDIE} es la carga tóxica para la curva dato de isodaño inmediatamente por encima del par (t, C) .

- Si uno o ambos de la $CDIE$ o la $CDID$ son independientes del tiempo de exposición, entonces el nivel de daño se interpola a partir de la concentración (C),

$$D(t, C) = D(t, C_{CDID}) + \frac{(C - C_{CDID})}{(C_{CDIE} - C_{CDID})}, \quad (2.1)$$

tomando como distribución vertical inicial a la definida por la carga tóxica en el tramo más inmediato en el que exista la dependencia, donde

C_{CDIE} es la concentración que produce un nivel de daño equivalente al de $CDIE$ en un tiempo t .

Además:

- Si el par (t, C) está por encima de la curva dato de isodaño 3, entonces $D(t, C) = 3$.
- Si C es menor que $C_{UMBRAL\ MINIMO}$, $D(t, C) = 0$.

- Si el par (t, C) está por debajo de la curva dato de isodaño 1 pero por encima de la curva umbral mínimo, se utiliza la ec. 2.1 en donde se cumple la siguiente igualdad

$$D(t, C_{CDID}) = D(t, C_{UMBRAL_MINIMO}) = 0.$$

En particular, en aquellos casos en que la sustancia causa algún daño con concentraciones inferiores al umbral establecido, la concentración umbral mínimo y el nivel de la curva dato de isodaño 1 coincidirán.

La figura 14 muestra los valores de referencia de los AEGL para el cloro, las curvas dato de isodaño que conectan dichos valores, y el campo continuo de los índices en intervalos de daño de 0.1, seleccionados arbitrariamente.

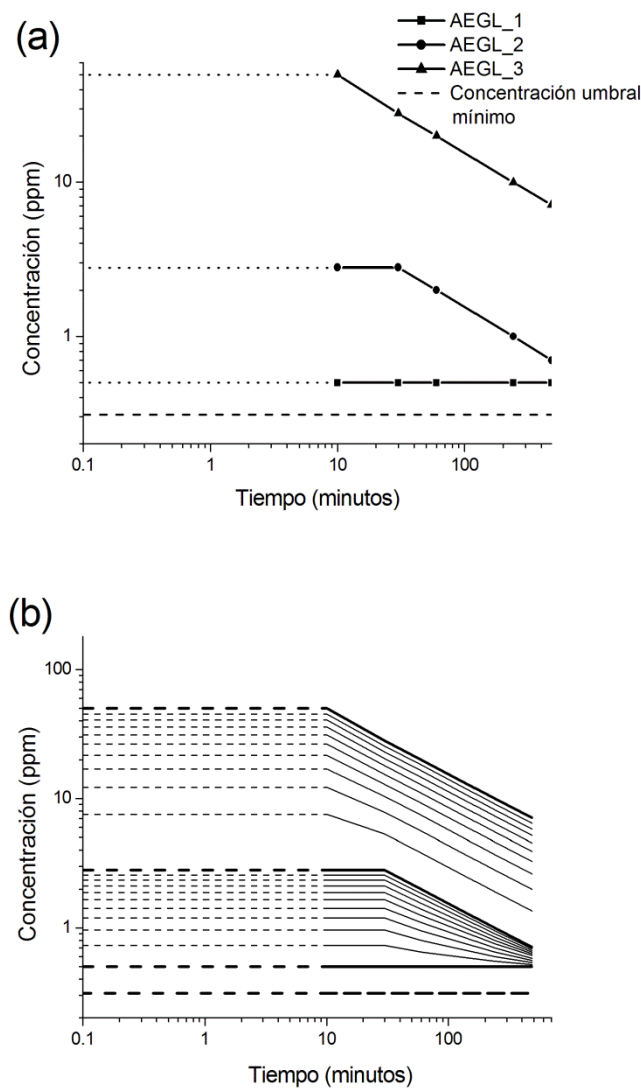


FIGURA 14: (A) REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS CURVAS DATO DE ISODAÑO PARA EL CLORO. (B) CAMPO CONTINUO DE CURVAS DE ISODAÑO PARA EL CLORO CON UN Δ AEGL DE 0.1, SELECCIONADO ARBITRARIAMENTE.

3.4 NO CONMUTATIVIDAD

El acoplamiento de los efectos parciales debido a la exposición a diferentes concentraciones a medida que transcurre el tiempo (diferentes pares $(t, C)_i$ donde $i= 1, ..., n$, son los eventos consecutivos o particiones de perfil) depende del orden temporal de los pares y por lo tanto es *no conmutativa*. El nivel de daño causado por una exposición caracterizada por un par $A=(t, C)_1=(t_1, C_1)$ después de una exposición caracterizada por un par $B=(t, C)_2=(t_2, C_2)$ puede ser diferente del daño causado por una exposición caracterizada por un par B después de una exposición caracterizada por un par A , es decir,

$$D(A \oplus B) \neq D(B \oplus A),$$

donde \oplus es el símbolo elegido para expresar la operación de acoplamiento.

En la sección 3.5.2 se presentará un ejemplo concreto en el que la conmutatividad falla.

3.5 ESTIMACIÓN DEL NIVEL DE DAÑO MÁXIMO Y MÍNIMO

A través de *DDC* es posible obtener una aproximación maximal y una minimal del nivel de daño durante el paso de la nube tóxica. Esta estimación progresiva basa su metodología en un algoritmo recursivo: acoplamiento de particiones sucesivas del perfil tiempo-concentración; llamaremos A al primer par y B al segundo para acoplar.

Los usuarios de *DDC* pueden ejecutar cualquier perfil de concentración, limitados sólo por la memoria disponible de la computadora. Esta limitación está estrechamente relacionada con el paso del tiempo, cuando $\Delta t \rightarrow 0$ implica un mejor ajuste al perfil. Por lo tanto, las fluctuaciones de la concentración serán mejor contempladas cuando Δt tienda a cero.

La forma de las curvas de isodaño dentro del campo continuo nos obliga a elegir diferentes operaciones de acoplamiento para obtener el nivel de daño máximo y mínimo, de modo de garantizar su condición minimal y maximal. A tal efecto, dos tipos de acoplamiento se definen: el **acoplamiento directo** (*DC*) y el **acoplamiento reverso** (*RC*). *DC* es un proceso fisiológicamente preferible a *RC* debido a que el primero respeta el orden temporal de los pares para el acoplamiento de los efectos parciales, y esto está estrechamente relacionado con el concepto de tolerancia.

3.5.1 ACOPLAMIENTO DIRECTO

Este tipo de acoplamiento se usa para calcular tanto el nivel de daño máximo y como el mínimo, los cuales coincidirán.

DC se puede aplicar siempre que la concentración del par B sea menor o igual a la concentración máxima de la curva de daño que contiene al par A .

Para adicionar exposiciones con diferentes tiempos, es necesario expresar el primer par A como función de la concentración del segundo par B , manteniendo la identidad de cada evento (nivel de daño).

Como se muestra en la Figura 15, el par A es transformado al par $A' = (t'_1, C_2)$ a través de una traslación a lo largo de la curva de isodaño, donde $D(A) = D(A')$. Entonces, t'_1 y t_2 son sumados. El daño debido a las exposiciones consecutivas, representadas por A y B , $D(A \oplus B)$, es equivalente al representado por $D(t'_1 + t_2, C_2)$. Entonces $DC = D(t_1, C_1) \oplus D(t_2, C_2) = D(t'_1 + t_2, C_2)$.

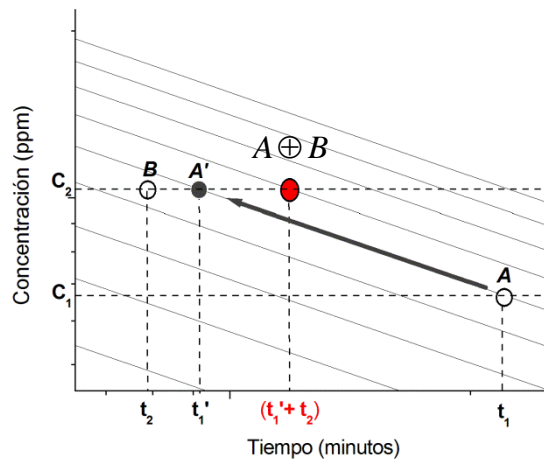


FIGURA 15: REPRESENTACIÓN DEL DC $A \oplus B$ EN UN CAMPO DE AEGLs DEL CLORO. EL DAÑO RESULTANTE DE LA EXPOSICIÓN CONSECUTIVA DE A Y B, $D(A \oplus B)$, ES EQUIVALENTE AL REPRESENTADO POR $D(t'_1 + t_2, C_2)$. ENTONCES $DC = D(t_1, C_1) \oplus D(t_2, C_2) = D(t'_1 + t_2, C_2)$.

Por razones inherentes a la forma de las curvas dato de isodaño, si la operación de acoplamiento se sitúa entre una *CDIE* dependiente del tiempo y una *CDID* independiente del tiempo, o entre dos curvas dato dependientes del tiempo con $n_{CDIE} > n_{CDID}$, *DC* puede necesitar de una corrección para reducir al mínimo el error de aproximación.

a) Si $C_2 > C_1$, *DC* devuelve un valor subestimado, pero puede ser optimizado. La Figura 16a muestra que $D(\alpha) = D(t_1 + t_2, C_1)$ existe, y que con seguridad puede considerarse minimal, ya que representa el nivel de daño causado por la exposición a la menor concentración de los dos, durante el tiempo total $t_1 + t_2$. Siendo $D(\beta) = D(t'_1 + t_2, C_2)$, si $D(\beta) < D(\alpha)$, entonces $DC = D(\alpha)$.

b) Si $C_2 < C_1$, *DC* devuelve un valor sobreestimado. La Figura 16b muestra que $D(\alpha) = D(t_1 + t_2, C_1)$ existe, y que con seguridad se puede considerar como maximal, ya que representa el nivel de daño causado por la exposición a la mayor concentración de los dos, durante el tiempo total $t_1 + t_2$. Siendo $D(\beta) = D(t'_1 + t_2, C_2)$, si $D(\beta) > D(\alpha)$, entonces $DC = D(\alpha)$.

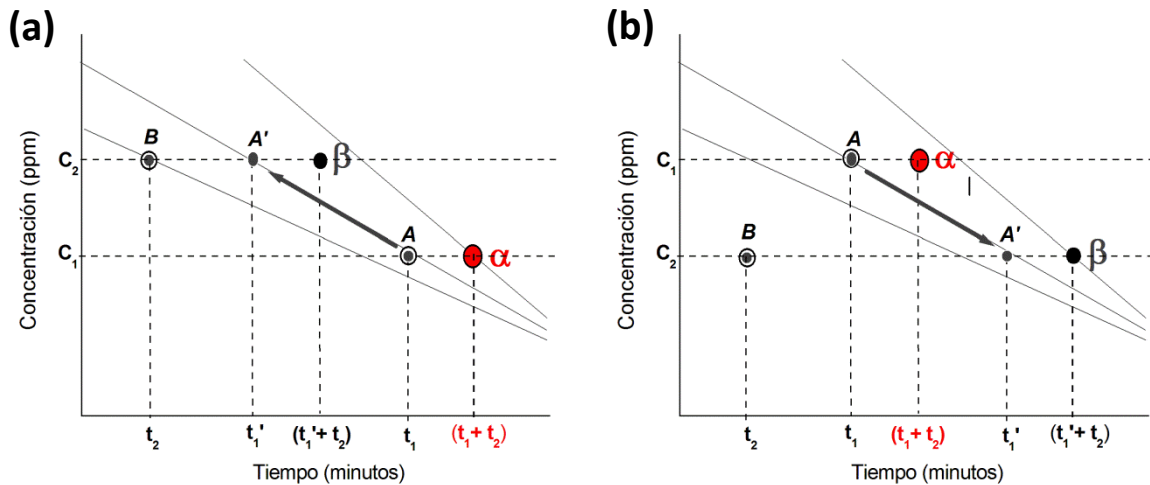


FIGURA 16: OPTIMIZACIÓN PARA *DC*, CUANDO LA OPERACIÓN DE ACOPLAMIENTO SE ENCUENTRA ENTRE UNA *CDIE* DEPENDIENTE DEL TIEMPO Y UNA *CDID* INDEPENDIENTE DEL TIEMPO, O ENTRE DOS CURVAS DATO DEPENDIENTES DEL TIEMPO, CON $n_{CDIE} > n_{CDID}$. (A) CASO ESPECIAL PARA $C_2 > C_1$, Y (B) CASO ESPECIAL PARA $C_2 < C_1$.

3.5.2 ACOPLAMIENTO REVERSO

Cuando la concentración del par B es mayor que la concentración máxima de la curva de daño que contiene al par A , entonces la operación de DC no se puede aplicar y RC es una alternativa para estimar el nivel de daño. La operación RC produce una divergencia entre los valores maximal y minimal, representando límites superiores e inferiores para el nivel de daño esperado.

3.5.2.1 ACOPLAMIENTO REVERSO MAXIMAL (MRC)

MRC utiliza dos métodos de sobreestimación ($Alt1$ y $Alt2$) para obtener el daño resultante, pero como dato útil es seleccionado el de menor nivel de daño. De esta manera, se garantiza la maximalidad y la sobreestimación se reduce al mínimo.

- Para aplicar $Alt1$, es necesario invertir el orden en que se experimenta la exposición, entonces $B \oplus A$ se obtiene en lugar de $A \oplus B$. En estas condiciones, el segundo par B se expresa como una función de la concentración del primer par A . Como se muestra en la Figura 17a, el par B se transforma en $B' = (t'_2, C_1)$ a través de una traslación a lo largo de la curva de isodaño que contiene al par B , donde $D(B) = D(B')$. Entonces t_1 y t'_2 se suman y a través de este procedimiento, un par $(t'_2 + t_1, C_1)$ es determinado, y el nivel de daño queda expresado por $D(t'_2 + t_1, C_1)$.

El daño resultante de exposiciones consecutivas representadas por B y A , $D(B \oplus A)$, es equivalente al representado por $D(t'_2 + t_1, C_1)$. Entonces $MRC_{Alt1} = D(t'_2 + t_1, C_1)$.

- Como se muestra en la Figura 17b, $Alt2$ compara los niveles de daño asociados a los pares A y B y se elige el más grande. Este método de sobreestimación representa el nivel de daño causado por la exposición a la mayor concentración (C_g) durante el tiempo total $t_1 + t_2$, por lo que con seguridad se puede considerar una sobreestimación. El daño es equivalente al representado por $D(t_1 + t_2, C_g)$. Entonces $MRC_{Alt2} = D(t_1 + t_2, C_g)$.

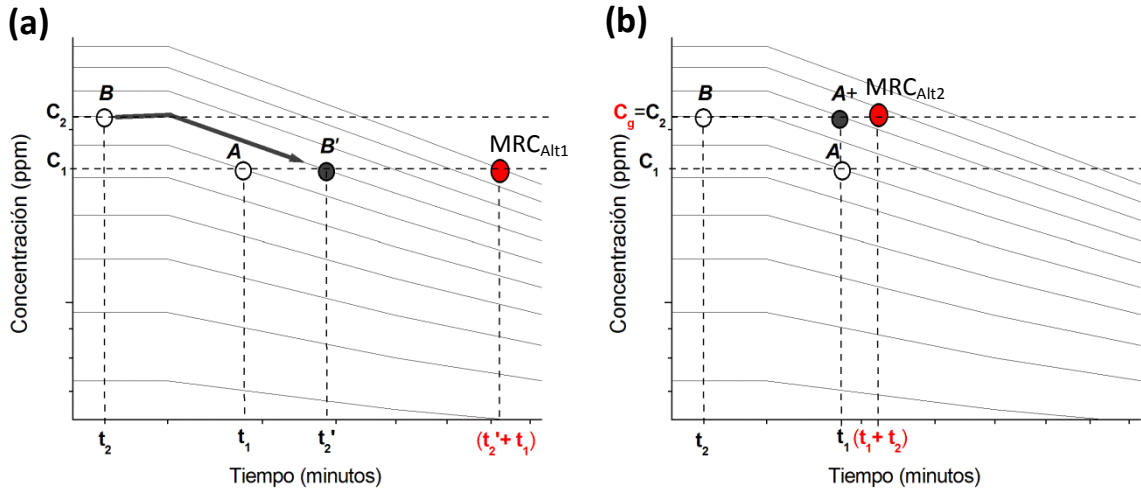


FIGURA 17: EL MRC COMPARA ALT1 (A) Y ALT2 (B), LUEGO LA SOBREESTIMACIÓN CON MENOR NIVEL DE DAÑO ES SELECCIONADA. (A) EL PAR B SE EXPRESA COMO UNA FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL PAR A. EL DAÑO, DEBIDO A LA EXPOSICIÓN CONSECUTIVA REPRESENTADA POR B Y A, $D(B \oplus A)$, ES EQUIVALENTE AL REPRESENTADO POR $D(t_2' + t_1, C_1)$. LUEGO $MRC_{Alt1} = D(t_2' + t_1, C_1)$. (B) ALT2 COMPARA LOS NIVELES DE DAÑO ASOCIADOS A LOS PARES A Y B, Y SE ELIGE ENTONCES EL VALOR MÁS GRANDE. EL DAÑO FINAL ES EQUIVALENTE AL REPRESENTADO POR $D(t_1 + t_2, C_g)$. LUEGO $MRC_{Alt2} = D(t_1 + t_2, C_g)$.

Para el caso en que tanto DC como MRC se pueden aplicar, se puede demostrar que $DC \leq MRC$, por lo que el resultado de MRC es siempre mayor que, o igual, al de DC . De acuerdo a lo mencionado, la figura 18 muestra un ejemplo en el que $D(A \oplus B) < D(B \oplus A)$ y entonces, la conmutatividad falla. Desde el punto de vista toxicológico, este caso ilustra el concepto de **tolerancia**. Este concepto de capacidad de respuesta reducida a un efecto tóxico, establece que la exposición anterior a una sustancia tóxica (siempre a niveles subletales) da lugar a un efecto protector para la segunda exposición, de mayor concentración, con un nivel menor de daño total asociado. ⁽⁴⁸⁾

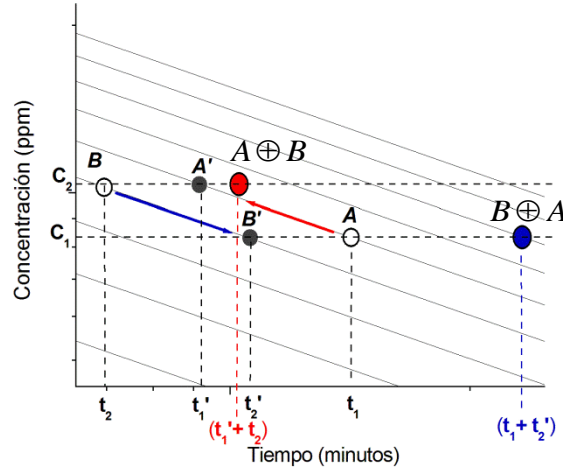


FIGURA 18: ESTE EJEMPLO MUESTRA QUE EL ACOPLAMIENTO DE LOS EFECTOS PARCIALES PUEDEN SER NO CONMUTATIVOS

Y, ADEMÁS, QUE LA ESTIMACIÓN POR *MRC* ES MAYOR QUE LA DE *DC*: $D(A \oplus B) < D(B \oplus A)$.

3.5.2.2 ACOPLAMIENTO REVERSO MINIMAL (MRC)

El *mRC* utiliza dos métodos de subestimación (*Alt1* y *Alt2*) para obtener el daño resultante, pero como dato útil es seleccionado el de mayor nivel de daño. De esta manera, se garantiza la minimalidad y la subestimación se reduce al mínimo.

- Como se muestra en la figura 19a, *Alt1* compara los niveles de daño asociados a los pares *A* y *B*, y opta por el más pequeño. Este método de subestimación representa el nivel de daño causado por la exposición a la menor concentración (C_l) durante el tiempo total $t_1 + t_2$, por lo que con seguridad puede ser considerada como una subestimación. El daño es equivalente al que representa $D(t_1 + t_2, C_l)$. Entonces $mRC_{Alt1} = D(t_1 + t_2, C_l)$.
- Por otro lado, como se muestra en la figura 19b, *Alt2* compara los niveles de daño asociados a los pares *A* y *B* y se elige así el más grande. Entonces t_1 y t_2 se suman. Finalmente, una concentración equivalente (C_{eq}) existe, que describe el nivel de daño resultante de $t_1 + t_2$. El daño es equivalente al representado por $D(t_1 + t_2, C_{eq})$. Entonces $mRC_{Alt2} = D(t_1 + t_2, C_{eq})$.

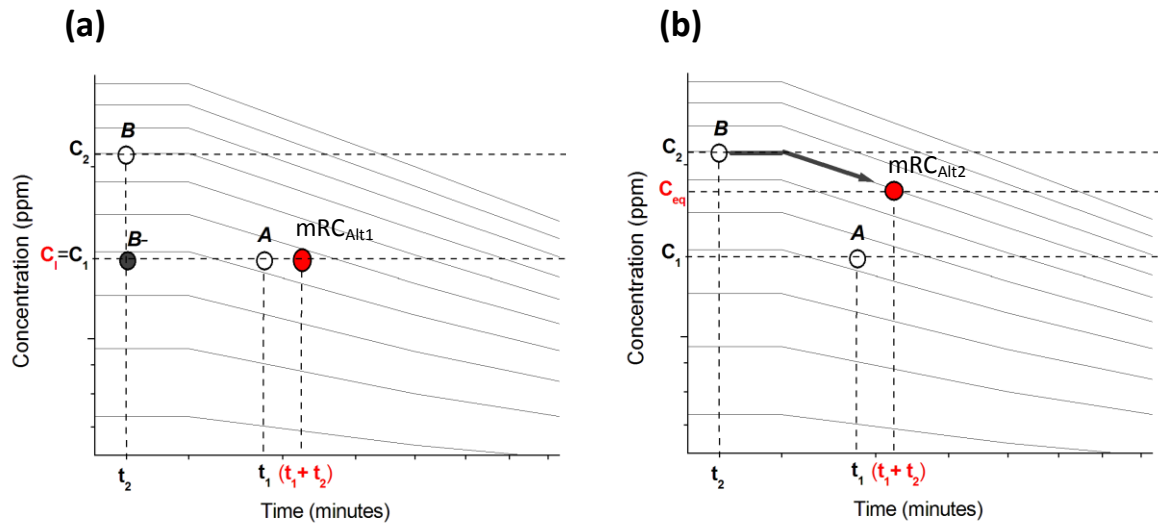


FIGURA 19: EL mRC COMPARA ALT1 (A) Y ALT2 (B), LUEGO LA SOBREESTIMACIÓN CON MAYOR NIVEL DE DAÑO ES SELECCIONADA. (A) ALT1 COMPARA LOS VALORES DE DAÑO ASOCIADOS A LOS PARES A Y B, Y ELIGE EL DE MENOR VALOR. EL DAÑO ES EQUIVALENTE A $D(t_1 + t_2, C_l)$, Y ENTONCES $mRC_{Alt1} = D(t_1 + t_2, C_l)$. (B) ALT2 COMPARA LOS VALORES DE DAÑO ASOCIADOS A LOS PARES A Y B, Y LUEGO ELIGE EL VALOR MÁS GRANDE. EL DAÑO EQUIVALENTE ES REPRESENTADO POR $D(t_1 + t_2, C_{eq})$, ENTONCES $mRC_{Alt2} = D(t_1 + t_2, C_{eq})$.

CAPÍTULO III

DISTRIBUCIÓN DE CONTAMINANTES EN AIRE

1 INTRODUCCIÓN

El problema del transporte de contaminantes en diferentes medios, ha sido ampliamente estudiado y, consecuentemente, su teoría establecida desde hace tiempo. Sin embargo, por las características propias del fenómeno y de las sustancias involucradas, la mejora y la optimización de los modelos disponibles, continúan siendo una necesidad y una apuesta de los investigadores.

En la actualidad, los modelos de dispersión constituyen importantes herramientas computacionales para predecir la concentración de un contaminante emitido a la atmósfera. Su uso en los más diversos ámbitos es cada vez más importante para la toma de decisiones económicas, ambientales y sociales, entre otros. En el caso de emisiones accidentales, los modelos representan una valiosa herramienta en la deliberación de medidas de protección y mitigación.⁽⁴⁹⁾

1.1 ANÁLISIS DE MODELOS DISPONIBLES DE TRANSPORTE DE CONTAMINANTES EN AIRE

De acuerdo con Dandrieux,⁽⁵⁰⁾ los modelos de dispersión pueden ser clasificados en tres categorías que son, en orden creciente de complejidad, los modelos gaussianos, los modelos de caja y los modelos de dinámica de fluidos computacional (CFD, por su denominación en inglés). El tipo de modelo apropiado para un uso particular depende de la magnitud del problema, del nivel de detalle de la información disponible como entrada al modelo, del nivel necesario de la salida del modelo, de la precisión requerida y del tiempo disponible de espera para concluir los cálculos del modelo.^(51, 52)

Los modelos gaussianos y de caja son ampliamente utilizados en los procedimientos de análisis de riesgos, proporcionando estimaciones rápidas de la dispersión. Sus resultados son

generalmente confiables en la descripción del comportamiento de una nube tóxica que se transporta sobre un terreno plano y sin obstáculos. Sin embargo, el hecho de que se represente al terreno como un nivel y no se tenga en cuenta los efectos de los edificios, tanques, árboles, cerros y canales, entre otros, condiciona los resultados y consecuentemente su aplicación. Por otra parte, una limitación importante que suelen tener los modelos simples para su aplicación en situaciones reales de emergencia es su estado estacionario. Esta suposición, si bien permite simplificar enormemente los cálculos, conlleva el problema de no contemplar perturbaciones tales como cambios en la dirección y magnitud del viento durante la ejecución, y la aparición de nuevas fuentes de emisión. ⁽⁵³⁻⁵⁶⁾

Los avances en la velocidad de las computadoras modernas, y en las técnicas CFD han impulsado al estudio de problemas ambientales complejos con modelos CFD. Los resultados obtenidos por estos modelos son más precisos que los modelos gaussianos y los de caja, ya que la velocidad del viento es completamente resuelta en comparación con los modelos más simplificados, donde la velocidad es un valor único o una función de la altura. La diferencia en los resultados se hace más obvia en aquellas zonas de estudio con grandes obstáculos. ^(57, 58) Por tal condición, en lo que respecta a emergencias químicas, los CFD constituyen una excelente herramienta para la planificación de respuesta en zonas densamente edificadas.

Los CFD, que, como bien mencionamos, tienen una gran capacidad descriptiva de los escenarios con una muy buena aproximación, no sólo poseen un elevado grado de complejidad sino que además demandan un gran costo computacional, requieren de numerosos datos y de un tiempo grande de ejecución, por lo que su aplicación para la respuesta a emergencias en tiempo real, no resulta factible.

En el marco de lo mencionado, como parte de esta tesis se presenta el desarrollo de un modelo numérico sencillo, con pocos parámetros de fácil interpretación, para la predicción de la distribución de contaminantes en una situación de emergencia química.

1.2 MARCO TEÓRICO DE FLUIDODINÁMICA.

Para comprender mejor las características del modelo presentado en esta tesis es importante entender algunos conceptos de la fluidodinámica; por tal motivo en esta sección nos introduciremos superficialmente en esta rama de la física.

Comenzaremos definiendo al medio de transporte involucrado en el modelo desarrollado, el fluido. Se dice que un fluido es una sustancia incapaz de resistir tensiones de corte sin deformarse. En tal sentido, el aire puede ser considerado como un fluido.

En el estudio de los fluidos en movimiento, la hipótesis del continuo resulta una herramienta más que interesante para los cálculos. Esta hipótesis enuncia que “los fluidos son considerados un continuo, como si no estuvieran compuestos por átomos y moléculas, en lo que a las leyes del movimiento se refiere”, y será considerada válida siempre que la escala de los movimientos sea mucho mayor que el camino libre medio entre las moléculas.

Para las situaciones estudiadas en esta tesis, todos los movimientos de fluidos implican escalas espaciales muchísimo mayores que dicho camino libre medio. Naturalmente, a medida que nos elevamos en la atmósfera el aire irá enrareciéndose cada vez más y llegará una altura en donde no será válida dicha hipótesis del continuo.

Puede definirse entonces, a la dinámica de fluidos (también llamada fluidodinámica), como el movimiento interactivo de un gran número de partículas individuales, en el que se supone que la densidad del fluido es suficientemente alta como para aproximar como un continuo.

Las principales ecuaciones de la dinámica de fluidos se basan en el comportamiento dinámico del mismo, y están determinadas por las leyes de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía. Este movimiento puede ser descripto por ecuaciones en derivadas parciales no lineales, denominadas ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales gobiernan cualquier fenómeno en el que se involucren fluidos newtonianos y no-newtonianos. Los newtonianos son aquéllos en los cuales la viscosidad es independiente de los gradientes de velocidades (aire, agua pura, etc.). Por lo tanto éstos son los de nuestro interés.

Si nos referimos a coordenadas cartesianas, las tres ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento en régimen **laminar** quedan dadas de la siguiente manera:

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \rho a_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j},$$

$$\text{donde } \tau_{ij} = 2\mu \left(e_{ij} - \frac{1}{3} e_{\gamma\gamma} \delta_{ij} \right), \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } i=j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases} \quad \text{y} \quad e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right).$$

El δ_{ij} es el denominado “delta de Kronecker” y el e_{ij} es un tensor simétrico, esto es, $e_{ij} = e_{ji}$. Por ejemplo, e_{yy} representa la divergencia del campo de velocidades.

Estas ecuaciones, así en su forma general aún para flujos laminares, no tienen solución analítica. Por tal motivo en física se recurre a la elaboración de modelos físicos o físico-matemáticos, contruidos con algunas hipótesis que coinciden con la realidad y otras que no, pero que en conjunto prestan una gran ayuda para encarar la solución de diversos problemas reales.

En muchas situaciones de interés práctico, puede considerarse a la viscosidad absoluta del fluido como constante, del mismo modo que al fluido como incompresible (es decir, densidad constante). Es así como las **ecuaciones de Navier- Stokes para flujo laminar con densidad y viscosidad constantes**, quedan simplificadas a la forma:

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = \vec{a} - \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{u} . \quad (3.1)$$

La derivada total en 3.1 representa a la aceleración total del fluido, comprendido por la aceleración parcial respecto del tiempo y la dada por los cambios espaciales de la velocidad (aceleración advectiva). El primer término del lado derecho de la igualdad constituye a la aceleración de las fuerzas de masa o volumen, tratándose de la aceleración de la gravedad en gran parte de los casos de interés. El segundo término representa las fuerzas de presión en el fluido y el último término a las aceleraciones dadas por las fuerzas viscosas. Este último término es del tipo difusivo.

Un análisis más profundo de estas ecuaciones puede encontrarse en Schlichting, Batchelor, Crowe et al., Hinze, Bird, entre otros. ⁽⁵⁹⁻⁶³⁾

1.2.1 INTRODUCCIÓN A LOS FLUJOS TURBULENTOS

Muchas situaciones de movimiento son de naturaleza turbulenta. Por contraposición a los flujos laminares o predecibles, los flujos turbulentos son, en general, no-predecibles o aleatorios. Esto significa que, conocidas las variables en un punto del espacio en un instante de tiempo, con la mera resolución de las ecuaciones de movimiento no se puede conocer el valor de dichas variables en otro punto del espacio y/o en otro intervalo de tiempo.

Para encarar, entonces, el estudio matemático y/o analítico de los flujos turbulentos se utiliza un modelo físico en el que se sustituye el campo dinámico de magnitudes que fluctúan al azar por un campo estático de magnitudes adecuadamente promediadas. Esto se conoce como el enfoque estadístico clásico de la turbulencia. Por lo tanto, descompondremos las magnitudes aleatorias en la suma de una magnitud promediada en el tiempo y otra fluctuante que representa el apartamiento de dicho valor medio.

En notación tensorial, lo mencionado anteriormente, queda expresado de la siguiente forma:

$$u_i(\mathbf{r}, t) = \overline{u_i} + u_i'$$

donde

$u_i(\mathbf{r}, t)$ representa a las tres componentes de la velocidad instantánea

$\overline{u_i}$ es la velocidad instantánea promediada en el tiempo, y

u_i' representa las componentes fluctuantes que indican el apartamiento del valor promediado en el tiempo.

Si el tiempo es suficientemente largo, el promedio en el tiempo de u_i' deberá ser nulo, pero no necesariamente será nulo el promedio en el tiempo del *producto* de dichas fluctuaciones.

Finalmente, las ecuaciones de Navier-Stokes para el flujo turbulento incompresible y con viscosidad absoluta constante quedan expresadas de la siguiente forma:

$$\frac{D\overline{u_i}}{Dt} = \overline{a_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \mathcal{T}_{ij} \right] \quad (3.2)$$

Como queda expuesto, la ecuación 3.2 se parece a las ecuaciones del flujo laminar presentadas en 3.1, pero en valores promediados en el tiempo, y con un término extra, denominado tensor de las tensiones de Reynolds:

$$\mathcal{T}_{ij}^{(t)} = -\rho \overline{u_i' u_j'} \quad (3.3)$$

El signo negativo en la ecuación 3.3 puede inducir a pensar que las tensiones turbulentas “le restan viscosidad” al flujo, pues aparentemente “disminuiría” el término de las componentes viscosas. Sin embargo esto no es así, pues generalmente una fluctuación positiva de la componente-x, digamos, va acompañada de una fluctuación negativa de la componente-y. Como consecuencia de ello, los productos entre fluctuaciones de distintas componentes serán positivos y, si bien habrá algunos negativos, el resultado de la suma de todas será positivo. Después de esta aclaración, puede afirmarse que los “efectos viscosos” en un flujo turbulento se verán incrementados respecto del flujo laminar. ⁽⁵⁹⁻⁶³⁾

El sistema de ecuaciones presentado para flujos turbulentos (ecs. 3.2 y 3.3) es un sistema no-cerrado; por tal motivo es necesario contar con un modelo de clausura: una expresión analítica para el tensor de Reynolds que “cierre” el conjunto de ecuaciones diferenciales vistas anteriormente.

2 METODOLOGÍA

Como base de conocimiento, la literatura demuestra cómo muchos problemas físicos pueden ser modelados analizando el balance de tres fenómenos: la **difusión**, la **advección** y la **reacción**. El primero se define como la dispersión de las especies involucradas en el proceso a lo largo del dominio físico del problema. La advección se relaciona con el transporte de especies debido a la presencia de campos de velocidad. Y por último, la reacción es el proceso de interacción mediante la cual se generan o se consumen las especies involucradas en el fenómeno. ⁽⁶⁴⁾

En esta sección se detalla la metodología llevada a cabo para formular, resolver numéricamente e implementar el modelo desarrollado de distribución de contaminantes en aire.

2.1 FORMULACIÓN DE MODELO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES

ATMOSFÉRICOS

La no linealidad de los numerosos procesos que se presentan en la atmósfera, junto al equilibrio necesario entre la exactitud de la representación y un costo computacional

razonable, contribuyen a que la formulación de un sistema que modele la dispersión de contaminantes atmosféricos no resulte una tarea sencilla.

En esta tesis, y de acuerdo a la metodología tradicional utilizada en las ecuaciones que describen los procesos atmosféricos, se aplica un sistema de coordenadas cúbico euleriano. El sistema se fija a nivel del suelo y, de este modo, las coordenadas espaciales quedan representadas en un esquema ortogonal: el eje OX es dirigido al este, el eje OY hacia el norte y el eje OZ hacia arriba.⁽⁶⁵⁾

La ecuación de transporte básica usada en modelos eulerianos de dispersión de contaminantes en aire está dada por la ecuación 3.4:

$$\frac{\partial \tilde{C}_i}{\partial t} + \frac{\partial(\tilde{u}\tilde{C}_i)}{\partial x} + \frac{\partial(\tilde{v}\tilde{C}_i)}{\partial y} + \frac{\partial(\tilde{w}\tilde{C}_i)}{\partial z} = D_c \left(\frac{\partial^2 \tilde{C}_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tilde{C}_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \tilde{C}_i}{\partial z^2} \right) + \tilde{S}_c, \quad (3.4)$$

donde

\tilde{C}_i es la concentración de la especie i en el aire, $i=1,...,n$,

\tilde{u} , \tilde{v} , \tilde{w} son las componentes de la velocidad del viento, \tilde{U} , en el sistema de coordenadas x , y , z ,

D_c es el coeficiente de difusión molecular del contaminante, y

\tilde{S}_c es el término que describe las fuentes y sumideros del contaminante, tal como fuentes de emisión y reacciones químicas.

Como bien se menciona en la sección 1.2.1 de este capítulo, en condiciones de flujos turbulentos tales como los que se presentan naturalmente en la baja capa límite atmosférica y en donde se desarrollan las nubes tóxicas, la ecuación 3.4 necesita ser modificada, utilizando procedimientos de promedios y clausura. Debido a la ausencia de datos y al poco tiempo disponible para la validación experimental de modelos complejos, recurrimos en esta tesis al desarrollo de un modelo simple, de pocos parámetros, con promedios en el tiempo.

A tal efecto, tomando valores promedios de la velocidad del viento, la ec. 3.4 queda expresada de la siguiente forma:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + u \frac{\partial C_i}{\partial x} + v \frac{\partial C_i}{\partial y} + w \frac{\partial C_i}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) + S_c \quad (3.5)$$

Con el objetivo de facilitar aún más los cálculos, se detallan a continuación simplificaciones adicionales.

- La reacción que experimenta la sustancia es considerada de primer orden, por lo que la concentración quedará expresada en función del tiempo de vida media de la sustancia en el aire.
- En nuestra discusión hemos supuesto implícitamente que el terreno es plano. Obviamente esto constituye una simplificación ya que raramente es el caso.
- D es constante e isotrópico.
- La componente normal al terreno, del vector velocidad del viento, se considera despreciable en relación al resto de las componentes. $w=0$.
- El suelo actúa como sumidero del contaminante.
- No existe capa de inversión que limite la dispersión a los contaminantes.
- El término fuente se representa con la función delta de Dirac.

Consecuentemente la ecuación 3.5 queda reformulada de la siguiente forma:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + u \frac{\partial C_i}{\partial x} + v \frac{\partial C_i}{\partial y} = D_c \left(\frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} \right) - \frac{0,693}{\tau_i} C_i + f(\vec{x}, t), \quad (3.6)$$

en $D \times (0, T)$

$$\text{con } f(\vec{x}, t) = \sum_r Q_r(t) \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - z_0).$$

u, v : valores medios de la velocidad del viento en las direcciones x, y , [m/s]

D_c : coeficiente de difusión molecular [m^2/s]

τ_i : constante de tiempo de vida media de la especie i en la atmósfera, [s]

Q_j : caudal másico no-estacionario de la fuente emisora j , [Kg/s]

δ : Delta de Dirac, [1/m].

x_0, y_0, z_0 : coordenada tridimensional $\in D$, de la fuente de emisión de la especie contaminante j , [m]

De otro modo, la ecuación 3.6 puede escribirse como:

$$\Delta C = \Delta C^A + \Delta C^D + \Delta C^R + \Delta C^S \quad (3.7)$$

donde ΔC es el cambio sobre el paso de tiempo, ΔC^A es el cambio del vector concentración debido a la advección, ΔC^D es el cambio debido a la difusión y ΔC^S es el operador fuente.

2.2 PARAMETRIZACION

2.2.1 ESTABILIDAD ATMOSFÉRICA: CLASIFICACIÓN

Este concepto está relacionado tanto con la turbulencia atmosférica como con el gradiente vertical de temperatura y las situaciones de inversión térmica. La estabilidad atmosférica nos proporciona una medida cualitativa de las variaciones de la densidad del aire, debidas a los cambios de presión y temperatura, y que influyen en determinados movimientos atmosféricos.

Los métodos para establecer las clases de estabilidad suelen necesitar de instrumentos especiales o de la determinación de parámetros de cierta complejidad. En tal sentido, resulta de gran utilidad otros procedimientos de predicción más sencillos basados en observaciones y parámetros de fácil medida. Para este propósito, Pasquill ⁽⁶⁶⁾ propuso un método que permite determinar los coeficientes de dispersión a partir de una clasificación sencilla de las condiciones atmosféricas, utilizando sólo información convencional suministrada por el servicio meteorológico local. Este método permite asociar alguna de las seis clases de estabilidad propuestas por Pasquill a cualquier situación atmosférica. A continuación se detalla la clasificación propuesta por Pasquill.

A: extremadamente inestable,

B: moderadamente inestable,

C: ligeramente inestable,

D: neutral,

E: ligeramente estable, y

F: moderadamente estable.

Los factores determinantes de las clases de estabilidad son:

- La velocidad del viento.
- La nubosidad.
- El flujo neto de radiación que llega a la Tierra: afecta al gradiente térmico vertical, a la presencia o ausencia de actividad convectiva y a la dinámica de la capa de mezclado.

Los dos primeros parámetros se miden de manera rutinaria en cualquier estación meteorológica. Sin embargo, la insolación puede calcularse a partir de parámetros astronómicos como detalla Santa Cruz en su trabajo. ⁽⁶⁷⁾

Posteriormente, Gifford ⁽⁶⁸⁾ caracterizó las clases de estabilidad propuestas por Pasquill como alguna de las clases que se muestran en la Tabla 1.

TABLA 1: ESQUEMA DE CÁLCULO PASQUILL-GIFFORD. CLASES DE ESTABILIDAD DE PASQUILL EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO, NIVEL DE INSOLACIÓN Y NUBOSIDAD.

Velocidad del viento a 10 m de altura (m s^{-1})	Día			Noche ⁴		Día o noche
	Radiación solar incidente ⁵			Despejado (Cubierto 3/8 o menos)	Seminublado (Cubierto 4/8 o más)	Cubierto
	Fuerte ($> 50 \text{ cal cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$)	Moderada (entre 25 y $50 \text{ cal cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$)	Leve ($< 25 \text{ cal cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$)			
<2	A	A-B	B	F	F	D
2-3	A-B	B	C	F	E	D
3-5	B	B-C	C	E	D	D
5-6	C	C-D	D	D	D	D
>6	C	C-D	D	D	D	D

⁴ Se entiende por noche al período comprendido entre una hora antes de la puesta de sol hasta una hora después de la salida del sol.

⁵ La insolación fuerte es la que corresponde a las horas centrales de los días de verano. La insolación ligera es la que corresponde a las horas centrales de los días de invierno.

Una estratificación neutral bajo condiciones de nubosidad densa cuando el flujo neto de radiación es cero, ya sea de día o de noche, define una clase de estabilidad tipo D. Una inversión térmica durante la noche dará lugar a una dispersión pobre bajo las condiciones de estabilidad E o F, de acuerdo al grado de nubosidad y a la velocidad del viento. Las clases de estabilidad A, B y C representan las condiciones diurnas con cantidades variables de radiación ingresante a la Tierra. Con bajas velocidades de vientos y fuerte radiación ingresante, estabilidad tipo A, se produce una intensa actividad convectiva y un fuerte mezclado. Esta última genera una capa de mezclado bien desarrollada de altura finita cubierta por una capa de inversión elevada. Flujos más bajos de radiación ingresante o velocidades de vientos más altas, se corresponden con una actividad convectiva moderada, tipo B, o con una actividad ligeramente convectiva, tipo C, o con algunos de los tipos intermedios A-B, B-C y C-D.

La clasificación de Pasquill goza de gran reputación por ser la primera clasificación racional de clases de estabilidad, porque sus resultados están avalados por mediciones y las desviaciones estándar del modelo gaussiano se calcularon en función de sus seis clases.

Para efectos de dispersión de contaminantes es deseable una condición atmosférica inestable ya que el movimiento vertical del aire se ve favorecido. En cambio, una condición estable obstaculiza el esparcimiento de los contaminantes del aire puesto que el aire más caliente se encuentra encima del frío inhibiendo así la mezcla vertical.

2.2.2 PERFIL DE VELOCIDADES DEL VIENTO.

La ley de potencias del viento se utiliza para ajustar la velocidad del viento observada, U_{ref} , desde una altura de medición de referencia, Z_{ref} , hasta la altura de emisión, h_s . La velocidad del viento a la altura de la fuente, U , es usualmente aplicada en la ecuación de la pluma Gaussiana y en otros tantos modelos.

La ecuación de la ley de potencias es de la forma:

$$U = U_{ref} \left(\frac{h_s}{Z_{ref}} \right)^p, \quad (3.8)$$

donde p es el exponente del perfil del viento. Los valores de p pueden ser dados por el usuario en función de la clase de estabilidad y del tipo de ambiente. Los valores establecidos son los que se muestran en la tabla 2.

TABLA 2: VALORES PARA EL EXPONENTE P EN FUNCIÓN DE LA CLASE DE ESTABILIDAD Y DEL TIPO DE AMBIENTE.

Clase de estabilidad	p	
	RURAL	URBANO
A	0.07	0.15
B	0.07	0.15
C	0.10	0.20
D	0.15	0.25
E	0.35	0.30
F	0.55	0.30

La velocidad del viento a la altura de la chimenea, U , no debe ser menor de 1.0 m/s.

2.3 CONDICIÓN INICIAL

Para obtener una solución a la ecuación de transporte 3.6. se requiere de la especificación de un campo de concentración inicial de todas las especies, el cuál es dado por la siguiente expresión:

$$C_i(x, y, z, 0) = C_i^*(x, y, z).$$

2.4 CONDICIONES DE CONTORNO

Dicha ecuación de transporte requiere de condiciones de contorno horizontales y verticales, dos para cada una de las direcciones x , y y z . La única excepción a estas condiciones son los modelos de escala global que simulan la atmósfera terrestre entera.

$$C_i(0, y, z, t) = C_i(L_x, y, z, t) = 0$$

$$C_i(x, 0, z, t) = C_i(x, L_y, z, t) = 0$$

$$C_i(x, y, 0, t) = C_i(x, y, L_z, t) = 0$$

donde L_x , L_y y L_z son las longitudes del mallado en las direcciones x , y , z , respectivamente. Las condiciones de contorno son nulas porque se supone un campo lejano "no contaminado" y al suelo como sumidero.

Finalmente, la solución de la ecuación 3.6, representa la concentración de la sustancia que se dispersa, y su conocimiento es de gran importancia en el estudio de los más variados problemas en los diferentes ámbitos. Las soluciones analíticas de este fenómeno quedan restringidas a condiciones iniciales y de fronteras extremadamente simples; por tanto, para obtener resultados para condiciones iniciales y de fronteras más complicadas, se requiere el uso de métodos numéricos para la resolución de las ecuaciones. ⁽⁶⁷⁻⁶⁹⁾

2.5 RESOLUCIÓN NUMÉRICA DE LA ECUACIÓN DE DIFUSIÓN-ADVECCIÓN-REACCIÓN CON UN ESQUEMA DE SEPARACIÓN DE OPERADORES

2.5.1 MALLADO

En primer lugar, es necesario adaptar el espacio físico en donde el flujo será estudiado. Para ello, se divide en un gran número de elementos geométricos llamados celdas de la grilla, generando consecuentemente una red (algunos autores utilizan el término malla con el mismo significado). La red consiste normalmente en dos o tres dimensiones de triángulos o cuadriláteros.

En las mallas cartesianas, los bordes de las celdas están orientados en paralelo a las coordenadas cartesianas, y esto permite que se puedan generar con gran facilidad. ^(70, 71)

A los fines prácticos, en esta tesis se considera una malla cartesiana.

2.5.2 MÉTODO SPLITTING

Algunos problemas de la física-matemática pueden ser reducidos a una cadena de problemas más simples, los cuales son resueltos en forma eficiente por las computadoras. Los métodos

utilizados para tal fin son conocidos como métodos de separación de operadores, siendo uno de los más importantes el esquema de separación componente por componente (splitting method) en el cual, a través de pasos sencillos, el sistema es dividido en n ecuaciones de acuerdo a las n variables que se tenga como incógnita. Para el modelo planteado en esta tesis, las incógnitas mencionadas están dadas por las dimensiones espaciales x , y y z .^(72, 73)

El error debido al método splitting se vuelve cero cuando $\Delta t \rightarrow 0$, pero desafortunadamente el valor máximo permisible de Δt no puede determinarse a priori. El Δt permisible depende fuertemente de los procesos simulados y del escenario.⁽⁷⁴⁾ McRae et al.⁽⁷⁵⁾ recomiendan el uso de $\Delta t < 10$ min para cuencas atmosféricas urbanas.

El criterio cualitativo de validez de este método es que los valores de concentración no deben cambiar rápidamente sobre el paso de tiempo seleccionado.⁽⁶⁵⁾

2.5.3 DISCRETIZACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL: MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS

(UPWIND) CON UN ESQUEMA IMPLÍCITO

Como bien se menciona la sección 2.1, debido a la complejidad del fenómeno de estudio, es dificultoso en general obtener una solución analítica para la ecuación de difusión-advección-reacción, por lo que es necesario usar técnicas numéricas para hallar una solución aproximada. Dentro de los métodos numéricos para tratar este fenómeno se destacan aquellos que generan esquemas discretos y que satisfacen la ecuación 3.6, cuya implementación computacional se vuelve eficiente y sencilla. La *eficiencia* es indispensable para mantener el sentido físico del modelo, mientras que la *sencillez* se requiere para resolver problemas complejos, a modo de reducir el esfuerzo computacional y obtener predicciones en un tiempo razonable.⁽⁶⁰⁾

En el marco de lo mencionado en esta sección, se recurre a una **resolución numérica implícita** para resolver la ecuación 3.6, siendo un método que reúne claros beneficios para el modelo planteado:

- Es robusto y converge rápidamente.
- Posibilita considerar intervalos de tiempo (Δt) más grandes que los permitidos en una resolución explícita.
- No requiere condiciones de estabilidad en un amplio rango de los parámetros.

Como es bien conocido que el método de diferencias finitas centradas conduce a esquemas numéricos inestables cuando se aplican a problemas en los que intervienen diferentes escalas, múltiples restricciones y/o altos gradientes, para el modelo desarrollado en esta tesis se ha recurrido a los esquemas "upwinding".^(75- 78) Esto se logra considerando en el numerador del término convectivo una derivada lateral a izquierda (siempre que $U > 0$). Notar que si $U < 0$ respecto a la malla cartesiana seleccionada, entonces el esquema debe estar descentrado a derecha.

Considerando que son 3 las variables (x, y, z) sobre las que se basa el esquema de separación de operadores, entonces $\partial t = \frac{\Delta t}{3}$.

Finalmente si $C_{i,j,k}^n \cong C(x_i, y_j, z_k, t^n)$, la discretización queda expresada del siguiente modo:

- I. Para (u, v, w) ≥ 0 , Los primeros tres pasos temporales del esquema de la ec. 3.6 quedan expresados como se muestra en la Tabla 3. Para pasos sucesivos, se vuelve a repetir el esquema presentado en la tabla, teniendo especial cuidado en considerar el superíndice adecuado al paso temporal en cuestión.

TABLA 3: APROXIMACIÓN DISCRETA DE LA ECUACIÓN DE TRANSPORTE 3.6 MEDIANTE DIFERENCIAS FINITAS.

OP.	PASO TEMPORAL		
	n	$n + \frac{1}{3}$	$n + \frac{2}{3}$
ΔC	$\frac{C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - C_{i,j,k}^n}{\frac{\Delta t}{3}}$	$\frac{C_{i,j,k}^{n+\frac{2}{3}} - C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}}}{\frac{\Delta t}{3}}$	$\frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+\frac{2}{3}}}{\frac{\Delta t}{3}}$
ΔC^A	$-u \left(\frac{C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - C_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}}}{\Delta x} \right)$	$v \left(\frac{C_{i,j,k}^{n+\frac{2}{3}} - C_{i,j-1,k}^{n+\frac{2}{3}}}{\Delta y} \right)$	
ΔC^D	$D_c \left(\frac{C_{i+1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - 2C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + C_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}}}{\Delta x^2} \right)$	$D_c \left(\frac{C_{i,j+1,k}^{n+\frac{2}{3}} - 2C_{i,j,k}^{n+\frac{2}{3}} + C_{i,j-1,k}^{n+\frac{2}{3}}}{\Delta y^2} \right)$	$D_c \left(\frac{C_{i,j,k+1}^{n+1} - 2C_{i,j,k}^{n+1} + C_{i,j,k-1}^{n+1}}{\Delta z^2} \right)$

ΔC^R	$-\frac{0,693}{\tau} \left(\frac{C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + C_{i,j,k}^n}{2} \right)$	$-\frac{0,693}{\tau} \left(\frac{C_{i,j,k}^{n+\frac{2}{3}} + C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}}}{2} \right)$	$-\frac{0,693}{\tau} \left(\frac{C_{i,j,k}^{n+1} + C_{i,j,k}^{n+\frac{2}{3}}}{2} \right)$
ΔC^S	$\sum_r Q_{r,i,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$	$\sum_r Q_{r,i,j,k}^{n+\frac{2}{3}}$	$\sum_r Q_{r,i,j,k}^{n+1}$

II. Para la situación en la que alguna de las componentes del viento sea negativa en referencia a la malla cartesiana, debe modificarse la aproximación upwind cambiando los puntos a considerar en la discretización para el término convectivo. Entonces:

- Si $u < 0$, los primeros tres pasos temporales quedan expresados como se muestra en la Tabla 4, para el término advectivo.

TABLA 4: APROXIMACIÓN DISCRETA DE LA ECUACIÓN DE TRANSPORTE 3.6 MEDIANTE DIFERENCIAS FINITAS. ESQUEMA PARA LA COMPONENTE ADVECTIVA, CON LA CORRECCIÓN UPWIND, BAJO LA CONDICIÓN DE COMPONENTE NEGATIVA EN LA DIRECCIÓN X.

Op.	PASO TEMPORAL		
	n	$n + \frac{1}{3}$	$n + \frac{2}{3}$
ΔC^A	$-u \left(\frac{C_{i+1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}}}{\Delta x} \right)$	$-v \left(\frac{C_{i,j,k}^{n+\frac{2}{3}} - C_{i,j-1,k}^{n+\frac{2}{3}}}{\Delta y} \right)$	

- Si $v < 0$, los primeros tres pasos temporales quedan expresados como se muestra en la Tabla 5, para el término advectivo.

TABLA 5: APROXIMACIÓN DISCRETA DE LA ECUACIÓN DE TRANSPORTE 3.6 MEDIANTE DIFERENCIAS FINITAS. ESQUEMA PARA LA COMPONENTE ADVECTIVA, CON LA CORRECCIÓN UPWIND, BAJO LA CONDICIÓN DE COMPONENTE NEGATIVA EN LA DIRECCIÓN Y.

Op.	PASO TEMPORAL		
	n	$n + \frac{1}{3}$	$n + \frac{2}{3}$
ΔC^A	$-u \left(\frac{C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - C_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}}}{\Delta x} \right)$	$-v \left(\frac{C_{i,j+1,k}^{n+\frac{2}{3}} - C_{i,j,k}^{n+\frac{2}{3}}}{\Delta y} \right)$	

- Para el caso en que tanto u como v sean menores que cero, se aplica la corrección al upwind con la misma lógica que en las tablas 4 y 5.

En el modelo presentado, los campos de concentración de contaminante son calculados para cada intervalo de tiempo, basados sobre la emisión y los campos meteorológicos promedios que pueden cambiar en el tiempo.

Finalmente, y conforme a los pasos temporales que gobiernan el “splitting”, podemos generalizar y representar la Tabla 3 en un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas:

$$\alpha_x C_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + \beta_x C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + \gamma_x C_{i+1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} = D^n, \quad (3.9)$$

$$\alpha_y C_{i,j-1,k}^{n+\frac{2}{3}} + \beta_y C_{i,j,k}^{n+\frac{2}{3}} + \gamma_y C_{i,j+1,k}^{n+\frac{2}{3}} = D^{n+\frac{1}{3}}, \quad (3.10)$$

$$\alpha_z C_{i,j,k-1}^{n+1} + \beta_z C_{i,j,k}^{n+1} + \gamma_z C_{i,j,k+1}^{n+1} = D^{n+\frac{2}{3}}, \quad (3.11)$$

Por tanto, para situaciones donde $u, v, w \geq 0$, los coeficientes $\alpha_x, \beta_x, \gamma_x$ y D^n de la ec. 3.9, quedan determinados por las ecs. (3.12)-(3.15):

$$\alpha_x = \left(-\frac{u}{\Delta x} - \frac{D_c}{\Delta x^2} \right), \quad (3.12)$$

$$\beta_x = \left(\frac{3}{\Delta t} + \frac{u}{\Delta x} + \frac{2D_c}{\Delta x^2} + \frac{0,693}{2\tau} \right), \quad (3.13)$$

$$\gamma_x = \left(-\frac{D_c}{\Delta x^2} \right), \quad (3.14)$$

$$D^{n+\frac{1}{3}} = \sum_r Q_{r,i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + \left(\frac{3}{\Delta t} - \frac{0,693}{2\tau} \right) C_{i,j,k}^n. \quad (3.15)$$

Bajo las mismas condiciones, los coeficientes de la ec. 3.10 quedan determinados por:

$$\alpha_y = \left(-\frac{v}{\Delta y} - \frac{D_c}{\Delta y^2} \right), \quad (3.16)$$

$$\beta_y = \left(\frac{3}{\Delta t} + \frac{v}{\Delta y} + \frac{2D_c}{\Delta y^2} + \frac{0,693}{2\tau} \right), \quad (3.17)$$

$$\gamma_y = \left(-\frac{D_c}{\Delta y^2} \right), \quad (3.18)$$

$$D^{n+\frac{2}{3}} = \sum_r Q_{r,i,j,k}^{n+\frac{2}{3}} + \left(\frac{3}{\Delta t} - \frac{0,693}{2\tau} \right) C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}}. \quad (3.19)$$

Y los coeficientes de la ec. 3.11 quedan definidos a continuación:

$$\alpha_z = \left(-\frac{D_c}{\Delta z^2} \right), \quad (3.20)$$

$$\beta_z = \left(\frac{3}{\Delta t} + \frac{2D_c}{\Delta z^2} + \frac{0,693}{2\tau} \right), \quad (3.21)$$

$$\gamma_z = \left(-\frac{D_c}{\Delta z^2} \right), \quad (3.22)$$

$$D^{n+1} = \sum_r Q_{r,i,j,k}^{n+1} + \left(\frac{3}{\Delta t} - \frac{0,693}{2\tau} \right) C_{i,j,k}^{n+\frac{2}{3}}. \quad (3.23)$$

Para aquellas situaciones donde $u, v < 0$, los coeficientes de la ec. 3.9 toman la siguiente forma:

$$\alpha_x = \left(-\frac{D_c}{\Delta x^2} \right), \quad (3.24)$$

$$\beta_x = \left(\frac{3}{\Delta t} - \frac{u}{\Delta x} + \frac{2D_c}{\Delta x^2} + \frac{0,693}{2\tau} \right), \quad (3.25)$$

$$\gamma_x = \left(\frac{u}{\Delta x} - \frac{D_c}{\Delta x^2} \right), \quad (3.26)$$

$$D^{n+\frac{1}{3}} = \sum_r Q_{r,i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} + \left(\frac{3}{\Delta t} - \frac{0,693}{2\tau} \right) C_{i,j,k}^n. \quad (3.27)$$

Para la ec. 3.10, y bajo las condiciones planteadas, los coeficientes quedan expresados como:

$$\alpha_y = \left(-\frac{D_c}{\Delta y^2} \right), \quad (3.28)$$

$$\beta_y = \left(\frac{3}{\Delta t} - \frac{v}{\Delta y} + \frac{2D_c}{\Delta y^2} + \frac{0,693}{2\tau} \right), \quad (3.29)$$

$$\gamma_y = \left(\frac{v}{\Delta y} - \frac{D_c}{\Delta y^2} \right), \quad (3.30)$$

$$D^{n+\frac{2}{3}} = \sum_r Q_{r,i,j,k}^{n+\frac{2}{3}} + \left(\frac{3}{\Delta t} - \frac{0,693}{2\tau} \right) C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}}. \quad (3.31)$$

2.5.4 OBTENCIÓN DE CAMPO DE CONCENTRACIONES: ALGORITMO DE THOMAS

Como resultado de la aplicación de un esquema de resolución implícito, las ecuaciones (3.9)-(3.11) resultan en un sistema tridiagonal.

El tipo especial de matrices que generan estos sistemas tridiagonales requiere demasiado tiempo y almacenamiento computacional, si es resuelto por la simple técnica de eliminación gaussiana. Consecuentemente, se recurre a una forma particular y eficiente de la técnica de eliminación gaussiana, que utiliza al algoritmo de Thomas.

Para entender el funcionamiento del mencionado algoritmo, se recurre a la explicación de un ejemplo con cuatro ecuaciones, cuyos coeficientes están en forma tridiagonal. ⁽⁷⁹⁾

$$\begin{aligned}
 b_1 x_1 + c_1 x_2 &= f_1 \\
 a_2 x_1 + b_2 x_2 + c_2 x_3 &= f_2 \\
 a_3 x_2 + b_3 x_3 + c_3 x_4 &= f_3 \\
 a_4 x_3 + b_4 x_4 &= f_4
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

El método consta de operaciones entre las filas de forma sistemática para eliminar los términos subdiagonales y normalizar los coeficientes de los términos diagonal al valor 1. La idea es transformar el conjunto tridiagonal original de ecuaciones en un conjunto equivalente diagonal superior.

$$\begin{aligned}
 x_1 + \beta_1 x_2 &= y_1 \\
 x_2 + \beta_2 x_3 &= y_2 \\
 x_3 + \beta_3 x_4 &= y_3 \\
 x_4 &= y_4
 \end{aligned} \tag{3.33}$$

Para expresar el sistema de ecuaciones 3.32 como el sistema 3.33, se necesita encontrar expresiones para β_i y y_i . Si se compara la primera fila de la ec. 3.33 con la de la ec. 3.32, se

observa que $\beta_1 = \frac{c_1}{b_1}$ y $y_1 = \frac{f_1}{b_1}$. Puede obtenerse la forma de la segunda fila de 3.33, si se

elimina x_1 entre la primera fila de la ec. 3.33 y la segunda fila de 3.32. La primera fila de la ec. 3.33 es, luego, multiplicada por a_2 y sustraída de la segunda fila de la ec. 3.32, generando la siguiente ecuación:

$$(b_2 - a_2\beta_1)x_2 + c_2x_3 = f_2 - a_2y_1 \quad (3.34)$$

El coeficiente de x_2 en la ec. 3.34 estará dado por $\alpha_2 = b_2 - a_2\beta_1$. Dividiendo luego, la ec. 3.34 por α_2 , queda:

$$x_2 + \frac{c_2}{\alpha_2}x_3 = \frac{f_2 - a_2y_1}{\alpha_2} \quad (3.35)$$

La ec.3.35 es ahora la forma de la segunda fila de la ec. 3.33. Se puede entonces identificar a

$$\beta_2 = \frac{c_2}{\alpha_2} \text{ y a } y_2 = \frac{(f_2 - a_2y_1)}{\alpha_2}.$$

Para continuar con esta metodología con las otras filas, se plantea a continuación una relación generalizada:

$$\alpha_i = b_i - a_i\beta_{i-1} \quad (3.36)$$

$$\beta_i = \frac{c_i}{\alpha_i} \quad (3.37)$$

$$y_i = \frac{(f_i - a_iy_{i-1})}{\alpha_i} \quad (3.38)$$

La solución del problema original, ec. 3.33, es dada sistemáticamente por sustitución hacia atrás, desde la última fila $x_4 = y_4$ hasta la primera. En forma general, se dice que $x_n = y_n$, donde n es el número de ecuaciones, y para $i < n$,

$$x_i = y_i - \beta_i x_{i+1} \quad (3.39)$$

Las relaciones recursivas, dadas por las ec. (3.36)-(3.38), constituyen al **algoritmo de Thomas**.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En esta sección, debido al acceso limitado a bases de datos y diseños experimentales para validar los modelos desarrollados, se ha recurrido a la comparación con metodologías y modelos vigentes ampliamente validados. A tal fin, a través de aplicaciones a escenarios de desastres, se analizan las ventajas y limitaciones de los modelos desarrollados en esta tesis. Los resultados aquí expuestos han sido publicados en revistas y congresos. ⁽⁸⁰⁻⁹⁰⁾

1 COMPARACIÓN CUANTITATIVA DE MÉTODOS DE EXPOSICIÓN VIGENTES CON DDC

El nivel de daño causado por la exposición a una concentración constante durante un intervalo de tiempo T es igual al nivel de daño resultante de la exposición a la misma concentración durante n intervalos consecutivos de tiempo t_i tal que $T = \sum_{i=1}^n t_i$. Este enunciado posibilita monitorear el nivel de daño causados a diferentes tiempos de exposición y comparar los resultados de *DDC* y con los de los métodos utilizados actualmente.

El primer ejemplo intenta representar tanto la contribución de la estimación progresiva como el grado de aproximación a las curvas dato de isodaño, mientras que en el segundo ejemplo queda expuesta la sobreestimación del nivel de daño con los métodos actuales, a partir de nuestra apreciación discreta.

Como primer ejemplo, la figura 20a muestra una exposición a 10 ppm de cloro gas durante 480 minutos. Para este escenario, se utilizó un intervalo de tiempo $\Delta t = 0.1$ min. Debido a la forma de funcionamiento del método español, cuando el perfil real es una constante, es de esperar que la estimación del daño a través del método español y *DDC* tenga el mismo resultado final y que también las aproximaciones maximal y minimal, coincidan. Sin embargo, sólo *DDC* puede

estimar tanto el nivel de daño en forma progresiva así como la severidad entre dos curvas dato de isodaño.

En este ejemplo, el método español prevé que la población podría experimentar efectos amenazantes para la vida, o muerte, (lo que equivale a un nivel de daño 3) si se está expuesto a una nube tóxica con las características del perfil de tiempo- concentración que se muestra en la Figura 20a. Sin embargo, la estimación a través de *DDC* muestra que este nivel de daño se puede alcanzar después de 240 minutos de exposición. Aunque el resultado final de los dos métodos parece ser consistente, la información detallada proporcionada por *DDC* puede ayudar a las responsables en la gestión de emergencias a tomar las decisiones correctas, teniendo en cuenta el tiempo con el que disponen para tomar medidas antes de que el nivel de daño se vuelva igual a 3.

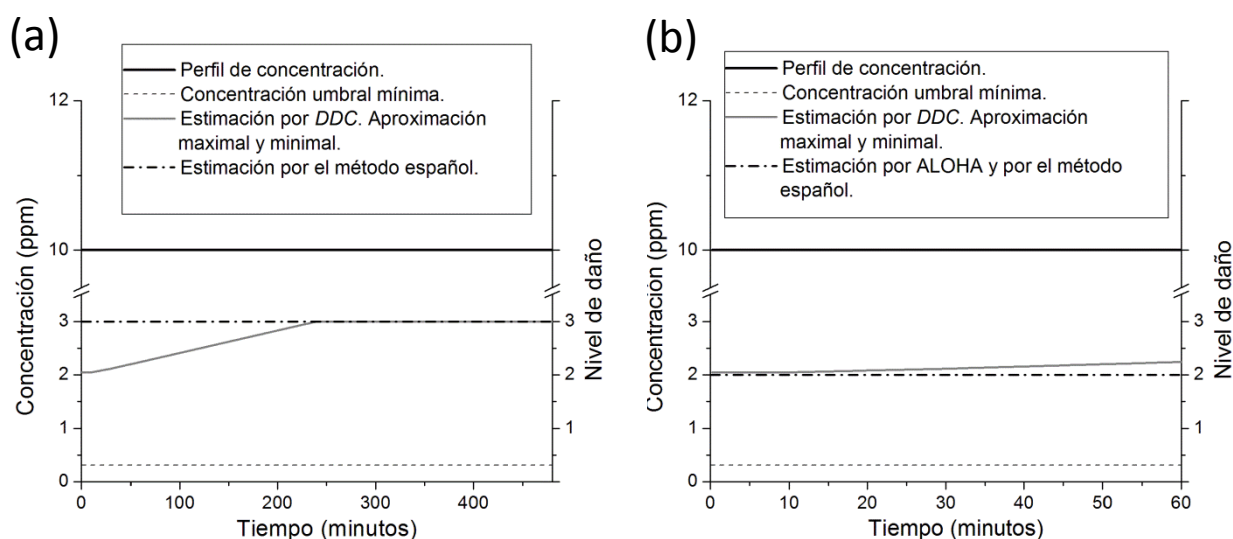


FIGURA 20: (A) REPRESENTACIÓN DE UN PERFIL PARA UNA CONCENTRACIÓN CONSTANTE DE 10 PPM DE CLORO DURANTE 480 MIN. LA ESTIMACIÓN DEL DAÑO ATRAVÉS DEL MÉTODO ESPAÑOL Y DE *DDC* TIENEN EL MISMO RESULTADO FINAL, DEL MISMO MODO QUE LA APROXIMACIÓN MAXIMAL Y MINIMAL COINCIDEN. SIN EMBARGO, SÓLO *DDC* PUEDE ESTIMAR, TANTO EL NIVEL DE DAÑO EN UN MODO PROGRESIVO COMO LA SEVERIDAD ENTRE DOS CURVAS DATO DE ISODAÑO. *DDC* MUESTRA QUE EL NIVEL DE DAÑO 3 SE ALCANZARÁ DESPUÉS DE LOS 240 MIN DE EXPOSICIÓN. (B) REPRESENTACIÓN DE UN PERFIL PARA UNA CONCENTRACIÓN CONSTANTE DE 10 PPM DE CLORO DURANTE 60 MIN. TANTO EL MÉTODO ESPAÑOL COMO ALOHA, PROVEEN UN VALOR ENTERO DEL NIVEL DE DAÑO IGUAL A 2 Y *DDC* DA UN VALOR DE 2.24, DE ESTE MODO *DDC* OFRECE INFORMACIÓN DE LA PROXIMIDAD A LAS CURVAS DATO DE ISODAÑO. EL PASO DE TIEMPO FUE SELECCIONADO ARBITRARIAMENTE (DT: 0.1 MIN).

Como se mencionó en la sección 2 del capítulo 2, ALOHA se limita a 60 min y a 10 kilómetros desde el origen de las emisiones. Esta limitación no permite aplicar ALOHA para el ejemplo planteado arriba. Sin embargo, si la exposición hubiera sido por tan sólo 60 minutos, como se

muestra en la figura 20b, tanto el método español y ALOHA proporcionarían un valor entero del nivel de daño igual a 2 y *DDC* daría un valor de 2.24, por lo que *DDC* proporcionaría información acerca de la proximidad a las curvas dato de isodaño y consecuentemente, una escala de la gravedad dentro del nivel de daño.

Por otro lado, como un segundo ejemplo, la figura 21a muestra un perfil similar al de la figura 20a, con la aparición de un pico de concentración de 20 ppm después de 20 minutos de exposición, durante 4 minutos. Es de esperar que esta concentración mucho más grande, sumada a la concentración de base constante, aumente el nivel de daño. Por otra parte, es razonable considerar que la tasa de crecimiento será mayor cuando transcurra el pico de concentración, pero esta tasa no se mantendrá en aumento cuando la concentración haya retomado su valor base. En la figura 21a, la diferencia entre la curva obtenida por el método de español, y la obtenida a través de *DDC* puede ser claramente observado. Mientras que el método español prevé un nivel de daño 3 sin tener en cuenta las características del perfil, la estimación maximal de *DDC* prevé que este nivel de daño se puede alcanzar después de 198.2 min, o después de 201.6 minutos, según la estimación maximal o minimal, respectivamente. De acuerdo con estas cifras, la población expuesta podría experimentar efectos adversos para la vida, o muerte, para tiempos superiores a 201.6 min, como tarde, y después de 198.2 min como temprano.

Si la exposición ha sido de tan sólo 60 minutos, tanto el método español como ALOHA proporcionarían un nivel de daño 3, como se muestra en la Figura 21b, mientras que *DDC* daría un valor de daño final de 2.40 y 2.42 para la aproximación minimal y maximal, respectivamente. Teniendo en cuenta que el método español y ALOHA calculan el nivel de daño de acuerdo a la concentración máxima registrada en el período de exposición total, se ve en este ejemplo que estas metodologías sobreestiman el nivel de daño, ya que no tienen en cuenta la longitud máxima del pico, lo que podría llevar a los responsables de la gestión de emergencias a tomar decisiones equivocadas.

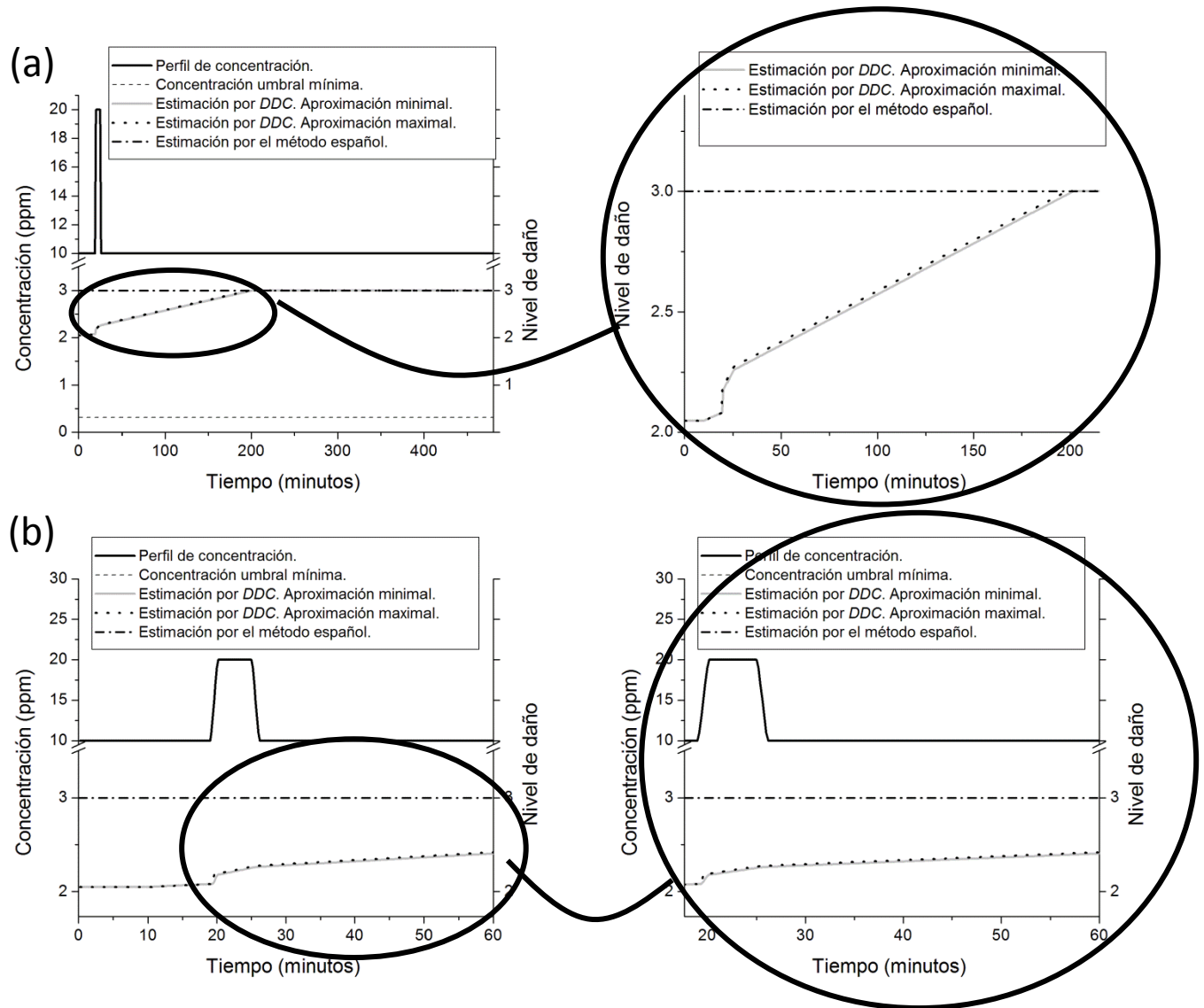


FIGURA 21: (A) REPRESENTACIÓN DEL PERFIL PARA UNA CONCENTRACIÓN EN AIRE, CONSTANTE, DE 10 PPM DE CLORO DURANTE 480 MIN CON LA OCURRENCIA DE UN PICO DE CONCENTRACIÓN DE 20 PPM DESPUÉS DE 20 MIN DE EXPOSICIÓN, DURANTE 4 MIN. ES RAZONABLE CONSIDERAR QUE LA TASA DE INCREMENTO SERÁ MAS GRANDE DURANTE EL PERÍODO DEL PICO, PERO QUE LA TASA NO SEGUIRÁ CRECIENDO CUANDO LA CONCENTRACIÓN HAYA RETORNADO A SU VALOR BASE. MIENTRAS QUE EL MÉTODO ESPAÑOL PREVÉ UN NIVEL DE DAÑO 3 SIN TENER EN CUENTA LAS CARACTERÍSTICAS DEL PERFIL, LA ESTIMACIÓN MAXIMAL DE DDC PREVÉ QUE ESTE NIVEL DE DAÑO SE PUEDE ALCANZAR DESPUÉS DE 198.2 MIN, O DESPUÉS DE 201.6 MINUTOS, SEGÚN LA ESTIMACIÓN MÁXIMAL O MINIMAL, RESPECTIVAMENTE. (B) REPRESENTACIÓN DEL PERFIL PARA UNA CONCENTRACIÓN EN AIRE, CONSTANTE, DE 10 PPM DE CLORO DURANTE 60 MIN CON LA OCURRENCIA DE UN PICO DE CONCENTRACIÓN DE 20 PPM DESPUÉS DE 20 MIN DE EXPOSICIÓN, DURANTE 4 MIN. TANTO EL MÉTODO ESPAÑOL COMO EL ALOHA PROPORCIONARÍAN UN NIVEL DE DAÑO 3, MIENTRAS QUE DDC DARÍA UN VALOR DE DAÑO FINAL DE 2.40 Y 2.42 PARA LA APROXIMACIÓN MINIMAL Y MAXIMAL, RESPECTIVAMENTE.

2 ANÁLISIS DE ESCENARIOS

En esta sección se recurrirá al análisis de escenarios con las herramientas desarrolladas y con otras de uso corriente a fin de analizar potencialidades, ventajas y limitaciones de cada una.

2.1 ESCAPE EN EL PARQUE INDUSTRIAL PILAR, ARGENTINA

El escenario propuesto es el Parque Industrial Pilar (PIP) en la provincia de Buenos Aires, Argentina, donde en marzo 1992 ocurrió un incidente que involucró la liberación de 5000 kg de cloro, en una planta química de producción de cloro, hipoclorito de sodio e hidróxido de sodio. Una serie de fallos en la celda de entrada de salmuera de la planta de electrólisis causó un nivel elevado de cloro en los tanques. Debido a que los trabajadores de la planta no podían controlar el aumento de la presión dentro de los tanques, decidieron apagar el sistema. Sin embargo no pudieron detener la reacción química y en consecuencia se produjo una explosión con una fuga de cloro. ⁽⁹¹⁾

El PIP es uno de los parques industriales más importantes de América del Sur, en términos de cantidad de fábricas ubicadas allí, y se encuentra a 5 kilómetros del centro urbano más cercano: Pilar. Afortunadamente en esa ocasión, la nube fue dirigida por el viento hacia un área abierta, lejos de Pilar. ^(91, 92) A fin de comparar métodos, se supone el mismo escenario pero con un viento predominante que sopla en dirección sureste y una liberación de 3300 kg min⁻¹ de cloro durante 8 minutos.

Es importante mencionar como características importantes de esta emisión que:

- El vapor de cloro es más denso que el aire y por lo tanto, es muy probable que se forme una nube tóxica densa a menos que las condiciones atmosféricas o a las características de la emisión formen una nube neutra.
- Las nubes densas son más peligrosas que las neutras ya que generalmente se mantienen a alturas bajas afectando a lo más vulnerable: los seres vivos.
- La dilución de las nubes densas es más lenta que las de las neutras, y es así que las primeras son capaces de viajar grandes distancias y permanecer por más tiempo en concentraciones altas que las segundas (siempre que en su trayectoria no encuentren obstáculos que favorezcan la mezcla turbulenta).
- El cloro es muy irritante y corrosivo. La respuesta a su inhalación, dependiendo de la concentración y el tiempo total de exposición, puede variar de irritación sensorial y reflejo de broncoconstricción, a la muerte por edema pulmonar o la falta de oxígeno durante un ataque de asma. De acuerdo con Amoore y Hautala, el umbral de olor es de 0,31 ppm, y un rango de 0.2-0.4 ppm se informó en otros estudios. ^(11, 25, 94, 95)

2.1.1 ANÁLISIS DE DDC: ACOPLAMIENTO CON MODELO DE TRANSPORTE DE GASES DENSOS (ALOHA)

La Figura 22 muestra una representación de las áreas de riesgo, trazada por ALOHA para este escenario, cuyas características se detallan en la Tabla 6. El área de daño roja representativa al mayor nivel de daño (AEGL-3) prevé a extenderse 5.9 kilómetros a favor del viento en la liberación. La naranja (AEGL-2) y la amarilla (AEGL-1) prevén extenderse más de 10 kilómetros.

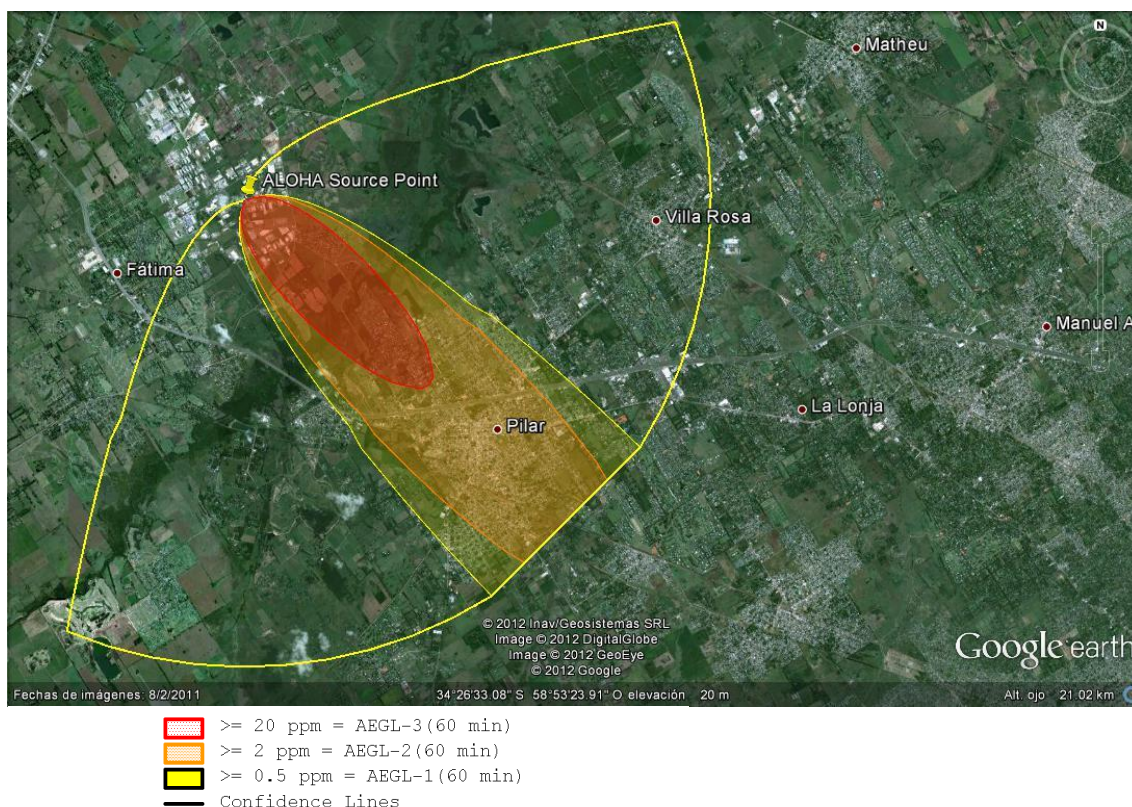


FIGURA 22: SIMULACIÓN DE UN ESCAPE DE CLORO EN PILAR, REALIZADA POR ALOHA. EN LA FIGURA, LAS REGIONES ROJAS, NARANJAS Y AMARILLAS REPRESENTAN LAS ÁREAS DONDE LAS CONCENTRACIONES DE CLORO EXCEDERÁN LOS VALORES CORRESPONDIENTES A LOS NIVELES 3, 2 Y 1 DE LOS AEGLS, RESPECTIVAMENTE. FUENTE: GOOGLE EARTH, 2011.

TABLA 6: INFORMACIÓN DE ENTRADA PARA LA CORRIDA CON ALOHA.

DATOS DEL LUGAR	Ubicación	Pilar, Argentina.
	Sustancia química	Cloro
	Punto de ebullición	-34.6° C
	Presión de vapor a temperatura ambiente	Mayor a 1 atm
DATOS DE LA SUSTANCIA QUÍMICA	Concentración de saturación del ambiente	1000000 ppm o 100.0%
	Peso molecular	70.91 g mol ⁻¹
	AEGL_1(60 min)	0.5 ppm
	AEGL_2(60 min)	2 ppm
	AEGL_3(60 min)	20 ppm
	Viento	2.3 m s ⁻¹ desde NO a 10 m
	Cobertura de nubes	5 décimas
DATOS ATMOSFÉRICOS	Temperatura del aire	20° C
	Clase de estabilidad	B
		Sin inversión térmica
	Humedad relativa	50%
	Altura de la fuente	0
INTENSIDAD DE FUENTE	Duración del escape	8 min
Fuente directa	Caudal de emisión	3300 kg min ⁻¹
	Masa total emitida	26400 kg
ZONAS DE RIESGO	Modelo ejecutado	Gases pesados

La figura 23 muestra el perfil de concentración observado a 5 km de la emisión. ALOHA predice que bajo las condiciones presentadas, la nube de cloro llegará a la ciudad de Pilar en unos 30 minutos desde la emisión. De acuerdo con la concentración máxima observada (27.1 ppm), ALOHA localiza a parte de la ciudad dentro de la zona con el mayor nivel de daño (más de 20 ppm, que se corresponde con el AEGL-3 para 60 min). Otro dato de aporta la Fig. 23 es que el tiempo total de exposición en Pilar es de unos 32 minutos, aproximadamente. Con esta información, los responsables de la gestión de emergencias deben ser capaces de tomar las decisiones correctas. Pero, ya sea debido a la falta de un análisis relacionado con el tiempo o a la apreciación discreta del nivel de daño, la información resulta incompleta. Cómo demostraremos a continuación, es posible conseguir una información más completa y sensible a través de *DDC*.

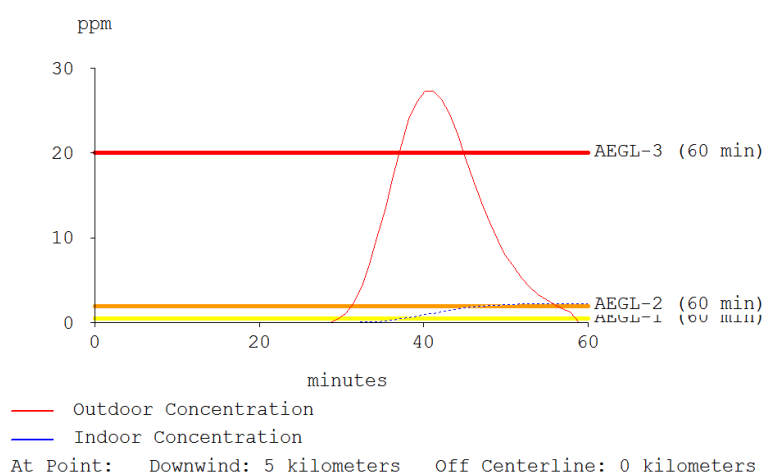


FIGURA 23: REPRESENTACIÓN DEL PERFIL DE CONCENTRACIÓN OBSERVADO EN LA CIUDAD DE PILAR. EL EJE HORIZONTAL DE ESTE GRÁFICO REPRESENTA AL TIEMPO (DE 0 A 60 MIN, DESDE QUE SE INICIÓ LA EMISIÓN), Y EL EJE VERTICAL REPRESENTA A LA CONCENTRACIÓN (EXPRESADA EN PPM) EN PILAR. SIMULACIÓN CON ALOHA.

Estimar el nivel de daño a través de los tres métodos descritos en la sección 2 del capítulo 2 para ciertas ubicaciones por donde pasa la nube ofrece un contraste interesante. A tal fin, los tres métodos se aplican a distancias de 4, 4.5, 5 y 5.5 kilómetros ($X = 4, 4, 4.5, 5$ y 5.5 kilómetros) viento abajo desde la fuente de emisión. La Figura 24 muestra los perfiles observados en las ubicaciones mencionadas, y en la Tabla 7 se detalla sus principales características. Para tener acceso a los valores de concentración en forma temporal, condición necesaria para ejecutar *DDC*, se ha realizado un ajuste de los perfiles de acuerdo a una distribución logarítmica normal sobre la base de la información en la Tabla 6.

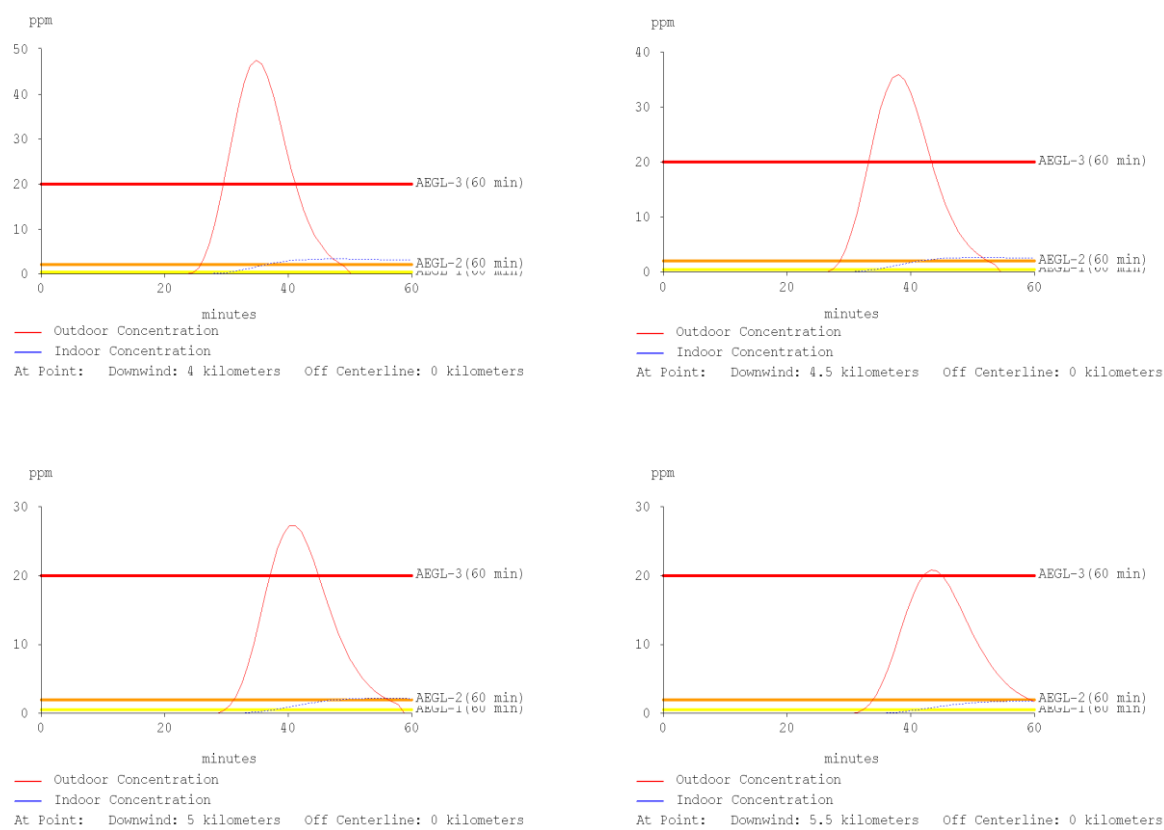


FIGURA 24: PERFILES DE CONCENTRACIÓN OBSERVADOS A 4, 4.5, 5 Y 5.5 KM VIENTO ABAJO DEL ESCAPE. CORRIDA REALIZADA CON ALOHA.

TABLA 7: CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS PERFILES OBSERVADOS A 4, 4.5, 5 Y 5.5 KM DESDE LA FUENTE DE EMISIÓN.

Ubicación relativa a la fuente emisora (kilómetros). Y=0	Concentración máxima (ppm)	Duración de exposición (minutos)
4	47	29
4.5	35.3	29
5	28.3	33
5.5	20	34.5

Para mostrar la evaluación realizada con cada uno de los perfiles, en la figura 25 se lleva a cabo la estimación del nivel de daño por los tres métodos sobre el perfil observado a 5.5 kilómetros viento abajo desde la fuente emisora.

Durante los primeros 10 minutos de exposición (entre 29 y 39 minutos), las estimaciones máximas y mínimas de *DDC* son muy diferentes y esto se debe tanto a la independencia en el tiempo de los AEGIs en este período, como al hecho de poder garantizar la maximalidad y la minimalidad de las aproximaciones. Después de este período tienden a ser muy similares, marcando un rango estrecho que contendrá al "verdadero" nivel de daño. Debido a que *DDC* relaciona la forma del perfil con la tasa de crecimiento del nivel de daño, se observa que después de alcanzar la máxima concentración en el perfil, la tasa de crecimiento disminuye pero nunca lo hace el nivel de daño.

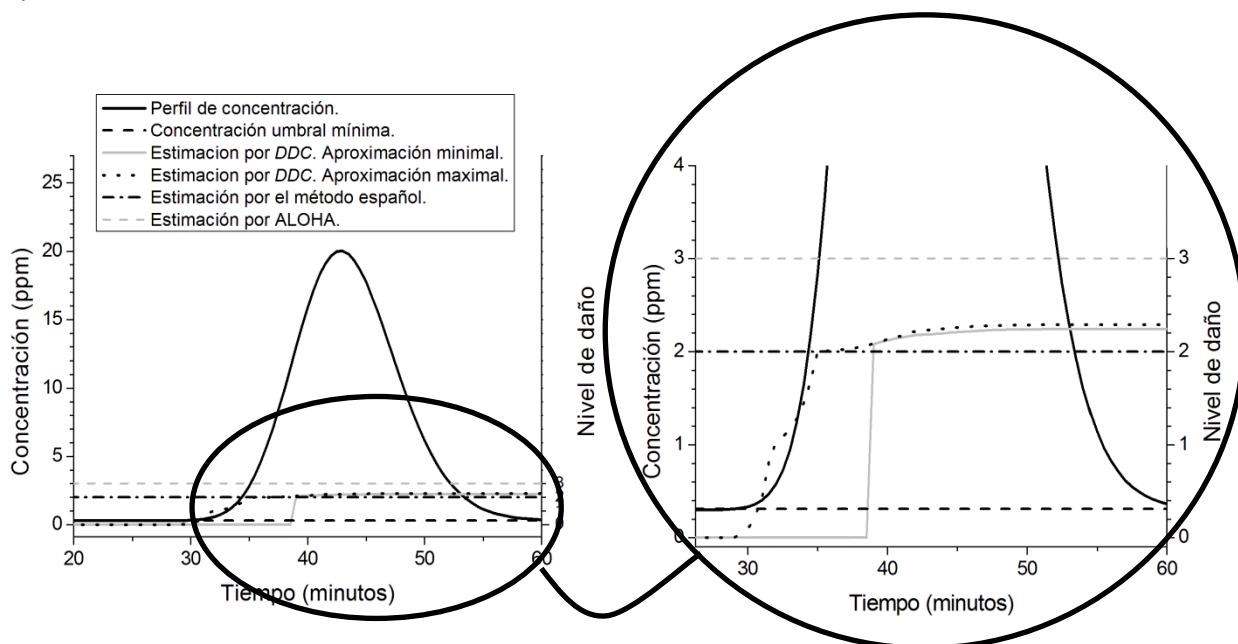


FIGURA 25: PERFIL OBSERVADO A 5.5 KM VIENTO ABAJO DESDE LA FUENTE EMISORA, JUNTO CON LA ESTIMACIÓN DEL NIVEL DE DAÑO POR LOS TRES MÉTODOS. A LA DERECHA, UN DETALLE DE LA EVOLUCIÓN DEL NIVEL DE DAÑO ES MOSTRADO.

Finalmente, después de evaluar el nivel de daño y su evolución en las ubicaciones propuestas, se concluye que la estimación por los tres métodos difiere. A través de este ejemplo se muestran las características que tienen o pueden tener los actuales métodos: **sobreestimación, apreciación discreta por una falta de sensibilidad y ningún detalle sobre la evolución del nivel de daño.** Por un lado, ALOHA ofrece un nivel de daño sobrestimado para el perfil evaluado, mientras que el método español ofrece un nivel de daño que, aunque el resultado esperado tras el paso de la nube coincide con el valor de daño dado por *DDC*, no da

detalles de la proximidad a las curvas dato de isodaño. Por último, ninguno de los métodos calcula la evolución temporal del nivel de daño.

Los niveles de los daños evaluados tras el paso de la nube tóxica se muestran en la Tabla 8. Debido a las cualidades ya mencionadas de *DDC*, se puede obtener una estimación más precisa y un enfoque más descriptivo del nivel de daño potencial, ofreciendo a los responsables de la gestión de emergencias un intervalo entre las aproximaciones maximal y minimal.

TABLA 8: NIVELES DE DAÑO ESTIMADOS DESPUES DEL PASO DE LA NUBE TÓXICA

MÉTODO DE ESTIMACIÓN	UBICACIÓN RELATIVA A LA FUENTE EMISORA (kilómetros) Y=0			
	5.5	5	4.5	4
ALOHA	3	3	3	3
ESPAÑOL	2	3	3	3
DDC	2.28	2.5	2.76	3

2.1.1.1 VENTAJAS Y LIMITACIONES DE DDC

A continuación se muestra un detalle de las ventajas del método:

- ***DDC proporciona una estimación progresiva de los daños experimentados.*** Por lo tanto, los datos cronológicos de los posibles efectos experimentados por la población expuesta se encuentran disponibles y, a su vez, se puede mantener un registro de las consecuencias más probables para la salud de la población. Lo que es interesante acerca de *DDC* es que el par resultante en cada acoplamiento se transforma en otro par con el mismo nivel de daño pero expresado en el tiempo real de la exposición a la nube tóxica y en una concentración equivalente. Por lo tanto, utilizando el campo continuo de los índices toxicológicos, siempre es posible encontrar un par $(t_{actual}, C_{equivalente})$ con el mismo nivel de daño que el par $(t, C)_i$ resultante del acoplamiento.

- **La fortaleza de DDC se encuentra en las operaciones de acoplamiento**, que requiere la existencia de un campo continuo de los índices toxicológicos para llevarlo a cabo. Por lo tanto, *DDC* puede utilizar siempre que sea posible la aplicación de un método de interpolación y extrapolación en el tiempo para los índices. Por último, la mejora de los índices toxicológicos contribuye a la mejora de *DDC* ya que es posible disponer de métodos de extrapolación y de interpolación para implementar.
- ***DDC* siempre tiene en cuenta el grado de proximidad a las curvas dato de isodaño**, de modo que teniendo en cuenta que se basa en la noción de un campo continuo de curvas, el resultado concluye en un enfoque más descriptivo. Los métodos actuales no cuantifican la gravedad entre dos curvas dato de isodaño, y sólo un valor entero de los daños es dado.
- ***DDC* proporciona información sobre el nivel de daño mínimo y máximo de exposición**; lo cual resulta útil para los responsables en la gestión de emergencias ya que ofrece un intervalo de estimación que asegura contener al daño “verdadero”.
- Es posible **introducir resultados de estudios experimentales** que asocian pares tiempo-concentración con nivel de daño o niveles de respuesta. Esto contribuye a una información más detallada.

Las limitaciones de *DDC*, y que constituyen posibles líneas de investigación para el futuro, son las siguientes:

- El método acopla los daños parciales siempre que la concentración de la exposición sea mayor que o igual a la concentración umbral mínimo. Cuando la concentración es menor que la concentración umbral mínimo, se supone que la exposición a la nube tóxica ha terminado, y cualquier efecto relacionado con el paso de nubes anterior no interfiere en los daños causados por las exposiciones futuras. Esta condición de frontera se indica, ya que, por un lado, es necesario establecer un umbral de concentración mínima para establecer los límites de la nube tóxica y, por otro lado, las contribuciones de las bajas concentraciones a la toxicidad general se desconocen.
- El tiempo de simulación de *DDC* está limitado a 8 horas, porque se aplica la definición de la exposición aguda. Sin embargo, es posible asumir un comportamiento de los

índices toxicológicos para tiempos de exposición, como se ve en el método español, y por lo tanto ampliar la utilidad de DDC.

2.1.2 ACOPLAMIENTO DE DDC CON UN MODELO DE DISPERSIÓN EN AIRE SIMPLE

El modelo de dispersión no estacionario desarrollado y presentado en el capítulo 3 puede simular una nube de contaminantes que ha sido emitida desde una fuente y es transportada en la atmósfera en la dirección predominante del viento. La condición de no estacionario permite reflejar cambios, como dirección y magnitud del viento o aparición de nuevas fuentes, que se le proporcionan al modelo como perturbaciones; del mismo modo que admite un monitoreo continuo de la evolución de la nube tóxica. Si bien las perturbaciones meteorológicas constituyen consideraciones artificiales, por la naturaleza misma de los procesos turbulentos y la complejidad de su medición, representan una herramienta valiosa para las actividades de entrenamiento del personal competente en emergencia, preparándolos con el factor sorpresa-respuesta.

Los modelos de dispersión ofrecen grandes ventajas para la gestión de riesgos en emergencias y desastres, pero estos deben ser validados ya sea usando datos de monitoreo o comparándolos con otros modelos ya validados. ⁽⁹⁶⁾ Su exactitud dependerá de muchos factores, entre ellos la exactitud de los datos de emisión, la calidad de los datos meteorológicos en la región y las aproximaciones de los procesos físicos y químicos en la atmósfera incluyendo el transporte y la transformación de los contaminantes.

Es importante mencionar que, muy frecuentemente, no se dispone de información propia del sitio y/o de la población que se está estudiando. En ese caso se tienen que asignar valores a los parámetros de los modelos, basándose en estadísticas nacionales o en base a la experiencia de los encargados de hacer la evaluación de riesgos. Esta situación debería poner en alerta a las autoridades competentes, a fin de elaborar una base de datos completa para el manejo de emergencias en distintos escenarios.

Por lo expuesto se aplica el modelo de transporte desarrollado en el capítulo 2, acoplado al modelo DDC, al escenario de Pilar ya presentado en la sección 2.1. Los datos de entrada requeridos por el modelo simple fueron consultados en la tabla 6.

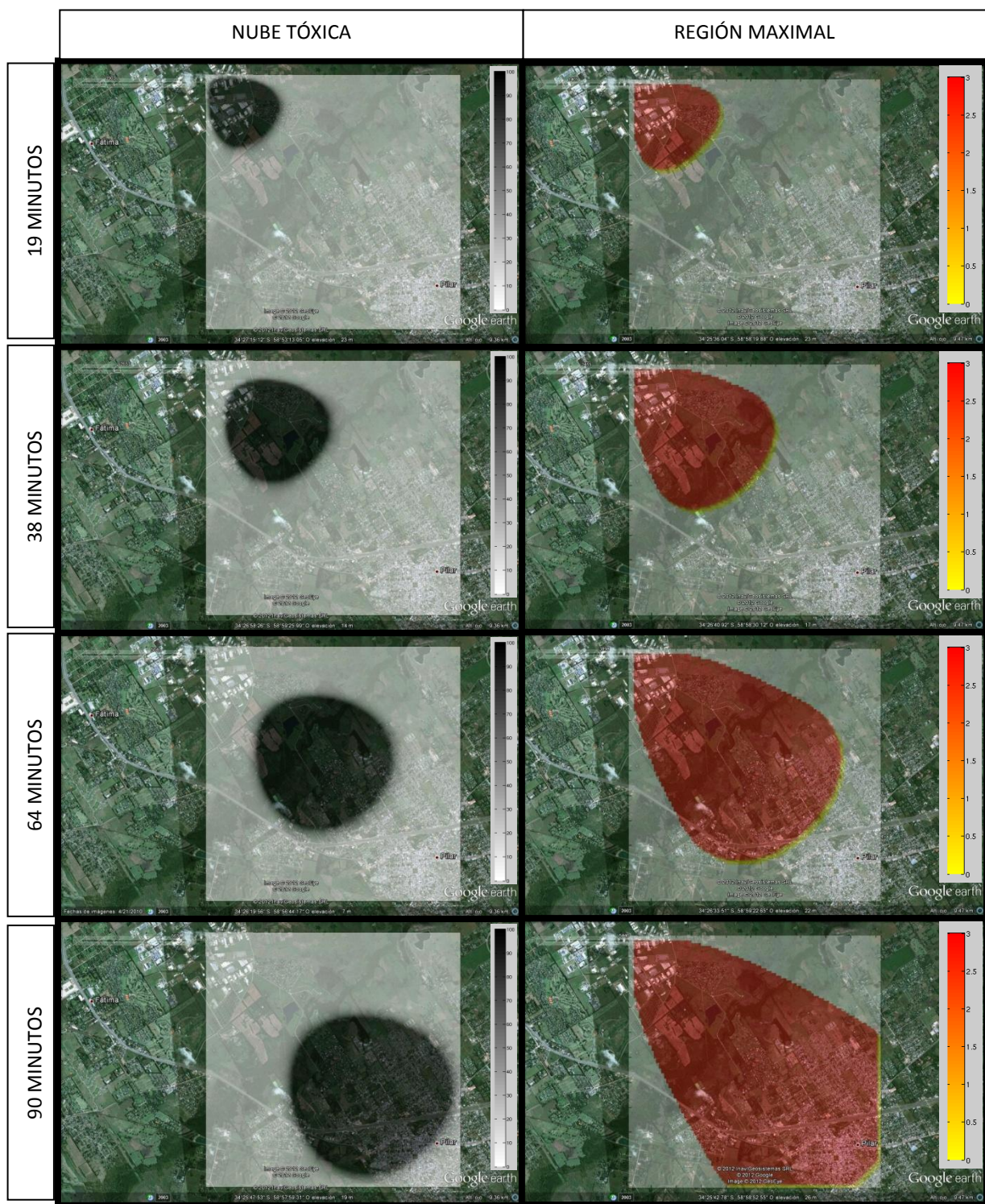


FIGURA 26: MODELO SIMPLE- DDC. REPRESENTACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE LA NUBE TÓXICA (PRIMERA COLUMNA) Y DE LAS REGIONES DE DAÑO MAXIMAL (SEGUNDA COLUMNA) PARA EL ESCAPE EN EL PARQUE INDUSTRIAL DE PILAR, EN LOS TIEMPOS DE SIMULACIÓN DE 19, 38, 64 Y 90 MINUTOS. FUENTE: GOOGLE EARTH, 2011.

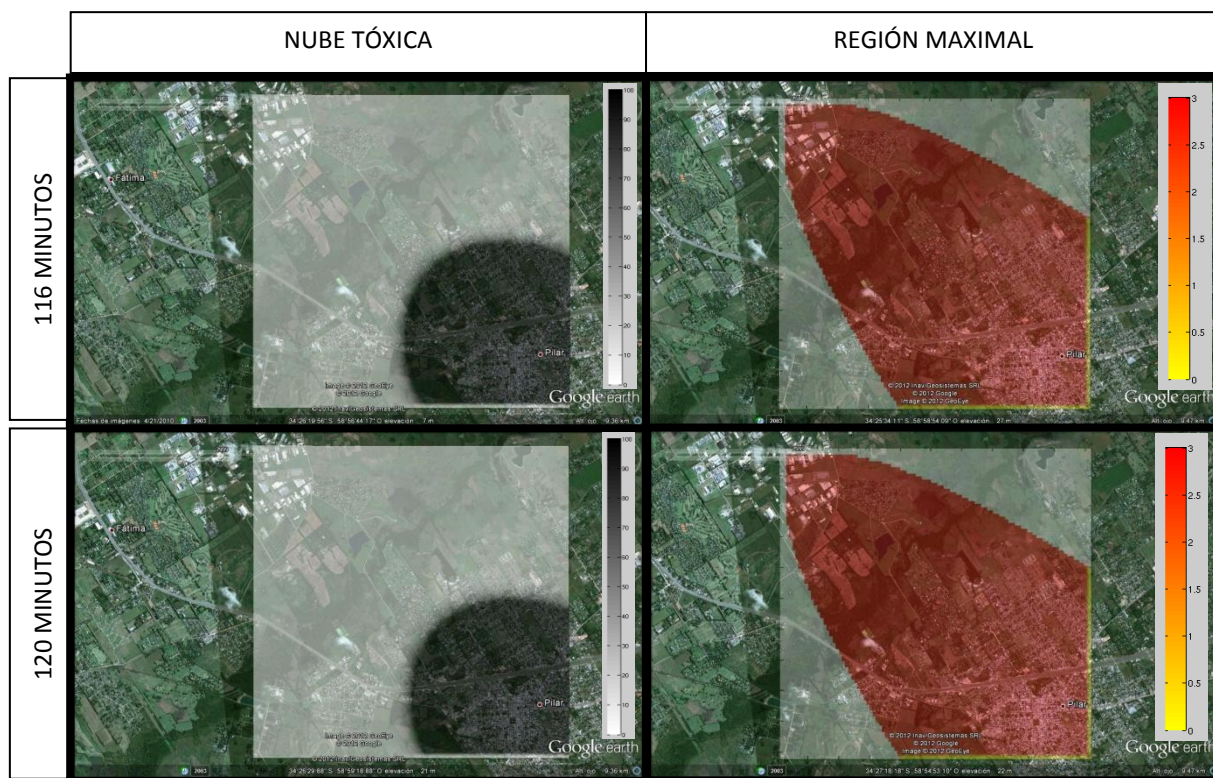


FIGURA 27: MODELO SIMPLE- DDC. REPRESENTACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE LA NUBE TÓXICA (PRIMERA COLUMNA) Y DE LAS REGIONES DE DAÑO MAXIMAL (SEGUNDA COLUMNA) PARA EL ESCAPE EN EL PARQUE INDUSTRIAL DE PILAR, EN LOS TIEMPOS DE SIMULACIÓN DE 116 Y 120 MINUTOS. FUENTE: GOOGLE EARTH, 2011.

En las Figuras 26 y 27 se presenta una simulación del escape en la industria química de Pilar. En las mismas puede observarse la evolución de la nube tóxica en las primeras dos horas de simulación (primera columna de las figuras mencionadas), del mismo modo que el avance de las regiones de daño maximal que están íntimamente relacionadas a las zonas de alto riesgo. La simulación de DDC (segunda columna) representa regiones de acuerdo a una escala de nivel de daño (ND), que a su vez está asociada a efectos potenciales sobre la salud de la población expuesta. La escala de rojos y amarillos situada a la derecha de cada gráfica nos permite estimar la magnitud de los daños. Un valor de ND tal que $0 \leq ND < 1$ representan niveles de exposición que producen ligero olor, sabor u otra irritación sensorial leve. Si $1 \leq ND < 2$, la población en general, incluyendo a las personas susceptibles como los lactantes, niños, ancianos, personas con asma, y aquellas con otras enfermedades, podría experimentar molestias notables, irritación o ciertos efectos asintomáticos. Estos efectos son transitorios y reversibles una vez que cesa la exposición. Si $2 \leq ND < 3$, la población mencionada podría experimentar efectos duraderos serios o irreversibles o ver impedida su capacidad para escapar, y si $ND = 3$, puede experimentar efectos amenazantes para la vida o incluso provocar la muerte.

Por su parte, la característica de fuente continua mantiene las concentraciones altas cerca a la fuente de emisión para los primeros tiempos de simulación. En la Figura 26 se observa como a los 19 minutos de simulación, la nube tóxica ya se comporta como un “puff”.

Como se muestra en la Tabla 9 y en las Figuras 26 y 27 , en las regiones maximal predomina el color rojo en porcentajes siempre mayores al 92%, referenciado al mayor nivel de daño (ND=3), mientras que el color amarillo representa a los niveles de daño comprendidos entre los valores de 1 y 3. El análisis de la Figura 28 representa con claridad la diferencia entre la aproximación minimal y la maximal cuando la nube ya ha abandonado la ubicación, es así como después de los 64 minutos es bien notoria la diferencia entre las áreas de cobertura maximal y minimal. Gráficamente se visualiza en las Figuras 27 y 28 que la nube tóxica es un “puff” debido a que la fuente dejó de emitir tiempo atrás.

TABLA 9: ÁREA DE COBERTURA DE LAS REGIONES DE DAÑO MAXIMAL PARA LOS TIEMPOS DE SIMULACIÓN DE 19, 38, 64, 90, 116 Y 120 MINUTOS.

TIEMPO (min)	Nivel de daño (ND)	MINIMAL	MAXIMAL
		Área cobertura (Km ²)	
19	1<=ND<2	0	0
	2<=ND<3	0.21	0.21
	ND=3	2.49	2.49
	TOTAL	2.70	2.70
38	1<=ND<2	0	0
	2<=ND<3	0.22	0.22
	ND=3	6.28	5.98
	TOTAL	6.50	6.20
64	1<=ND<2	0	0
	2<=ND<3	0.24	0.23
	ND=3	12.5	10.59
	TOTAL	12.74	10.82
90	1<=ND<2	0	0
	2<=ND<3	0.26	0.25
	ND=3	19.65	15.19
	TOTAL	19.91	15.44
116	1<=ND<2	0	0
	2<=ND<3	0.04	0.04
	ND=3	25.69	17.84
	TOTAL	25.73	17.88

120	1<=ND<2	0	0
	2<=ND<3	0.02	0.01
	ND=3	25.91	17.48
	TOTAL	25.93	17.49

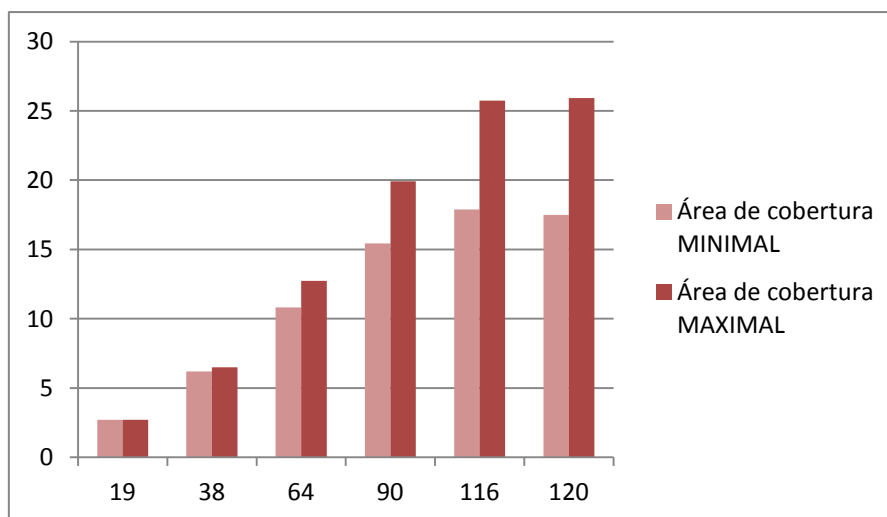


FIGURA 28: EN EL EJE DE LAS ABCISAS SE REPRESENTA AL TIEMPO DE SIMULACIÓN EN MINUTOS, MIENTRAS QUE EN EL EJE DE LAS ORDENADAS SE MUESTRA AL ÁREA DE COBERTURA EN KM² POR LAS REGIONES MAXIMAL Y MINIMAL.

Una herramienta de la que dispone el INDEC⁽⁹⁷⁾ se ha utilizado en esta sección para estudiar la cantidad de población potencialmente expuesta a la nube tóxica. La misma nos ha permitido deducir que a los 38 minutos de simulación las poblaciones de Pilar (231639 habitantes) y del Barrio Parque Almirante Irizar (3085) comienzan a percibir al cloro en el aire, superando la concentración a las 0.31 ppm que representa al umbral olfativo. De este modo, los afectados sumarían un total de 234724 habitantes.

Las diferencias que surgen entre la simulación con ALOHA y con modelo simple desarrollado pueden deberse a que, si bien, tanto el modelo de gases densos que usa ALOHA como el modelo desarrollado en el capítulo 3 son sencillos, no hacen uso de los mismos parámetros y es por ello que resulta difícil hacer corridas similares. Una de las suposiciones que se hizo para la simulación con el modelo simple es que el cloro no sufre reacción en la atmósfera y esta es una de las razones por la cual la nube perdura por más tiempo en el aire y en concentraciones altas, a diferencia de la corrida con ALOHA.

2.2 ESCAPE EN CHICAGO, ESTADOS UNIDOS

2.2.1 ACOPLAMIENTO DE DDC CON UN CFD

Como bien se mencionó en secciones anteriores, el daño potencial de la liberación accidental de sustancias peligrosas en la atmósfera sigue siendo motivo de preocupación, pero de interés especial en regiones urbanas densamente pobladas.

Los patrones espaciales y las variaciones en el tiempo de las concentraciones de sustancias peligrosas, junto a los efectos potenciales sobre la población subyacente, son necesarios para ayudar a la planificación y respuesta en una emergencia. ^(56, 98)

En esta sección se presentan los resultados obtenidos mediante el acoplamiento de un modelo CFD, FLACS, con el modelo de exposición DDC. Esta herramienta se aplicó para la simular una liberación de cloro cerca del centro de Chicago, IL, Estados Unidos. Los resultados muestran cómo esta herramienta es capaz de predecir con gran nivel de detalle la dispersión atmosférica de sustancias químicas peligrosas, y el daño potencial en la población expuesta, para apoyar a los decisores en la planificación y preparación de emergencia. Con este ejemplo se pretende analizar la importancia de esta herramienta para la planificación de respuesta a emergencias en ciudades, ya que reconocemos que una mejora en la planificación está estrechamente vinculada con sistemas de alarma temprana y esto contribuye sustantivamente a la mejora en la respuesta a una emergencia.

2.2.1.1 MODELOS UTILIZADOS

Los CFD que, como bien mencionamos, tienen una gran capacidad descriptiva de los escenarios con una muy buena aproximación, no sólo poseen un elevado grado de complejidad sino que además demandan un gran costo computacional, requieren de numerosos datos y de un gran tiempo de ejecución, por lo que su aplicación para el manejo de emergencias en tiempo real no resulta factible. Sin embargo, constituyen una excelente herramienta para la etapa de planificación en gestión de riesgos. ⁽⁹⁹⁾

Dos estudios comparativos realizados por Hanna et al. ^(100, 101), concluyeron que las predicciones de FLACS son coherentes con las predicciones de los modelos de dispersión ampliamente usados, en escenarios con terreno plano, sin obstáculos y sin cambios en la magnitud y dirección del viento. En aquellas situaciones donde los escenarios presentan alguna complejidad que se aleja de las características mencionadas, la predicción de los modelos más simples no representa adecuadamente la realidad.

El modelo FLACS fue originalmente desarrollado para simular explosiones. Actualmente se utiliza en otras áreas como la dispersión de gases y su aplicación es respaldada por una cantidad importante de estudios de validación. ^(56, 102, 103) Las ecuaciones de Navier- Stokes son resueltas numéricamente a través del método de volumen finito y un modelo de clausura k-epsilon sobre un mallado cartesiano. Hjertager ^(104, 105) detalla las ecuaciones utilizadas en FLACS y Hjertager et al. ^(106, 107) analiza diferentes experimentos de campo aplicados en el desarrollo de FLACS. Una descripción más detallada de FLACS es presentada por Warner et al. y Hanna et al. ^(98, 102, 103, 108)

Por otra parte y como ya se discutió en secciones y capítulos anteriores, con los ajustes que DDC proporciona al sistema de emergencias actual, no sólo se logra estimaciones más exactas del nivel de daño esperado respecto a los métodos vigentes sino que, además, resulta sumamente útil en situaciones de triage ⁶ donde los recursos son limitados y no hay margen para el error. ⁽⁸¹⁻⁹⁰⁾

2.2.1.2 ACOPLAMIENTO

Quaranta et al. expresan en su trabajo ⁽¹⁰⁹⁾ que un sistema robusto capaz de predecir la dispersión atmosférica de sustancias químicas peligrosas constituye una herramienta clave para apoyar decisiones en la planificación de respuesta a una emergencia, del mismo modo, para los equipos de preparación y rescate que deben actuar rápidamente en las áreas de impacto.

En esta tesis se valora la importancia de los modelos de transporte en la gestión integral de una emergencia; sin embargo, se sostiene que aún cuando FLACS (u otro modelo CFD) pueda dar cuenta de los detalles del movimiento del flujo en forma más precisa que los modelos estándar ampliamente utilizados, este nivel de detalle en situaciones de emergencia resulta insuficiente si no se realiza un análisis conjunto con los aspectos toxicológicos de la población expuesta. En tal sentido, resulta fundamental lograr estimar dónde y cuándo los niveles guía (llámese AEGLs, ERPGs y/o TEELs) son superados.

⁶ Triage: Sistema de categorización de población expuesta y de los recursos disponibles utilizados en situaciones de urgencias y emergencia.

Para los propósitos de este trabajo, DDC toma como datos de entrada a los perfiles de concentración observados en cada celda del mallado, en el plano $Z = 1$ m, donde Z es la altura sobre el nivel del terreno en la simulación de FLACS. Por medio del concepto de carga tóxica, el cual relaciona dos factores que influyen conjuntamente a la toxicidad de la sustancia (concentración y tiempo de exposición), se determinan los efectos potenciales en la salud y, consecuentemente, DDC estima el nivel de daño potencial sobre la población expuesta a la nube tóxica.

2.2.1.3 DESCRIPCIÓN DE UN ESCAPE HIPOTÉTICO DE CLORO EN EL CENTRO DE CHICAGO (E.E.U.U)

Se ha considerado a Chicago como el escenario de estudio ya que Hanna et al. ⁽⁵⁶⁾, amablemente, nos han autorizado a utilizar sus datos y corridas. El lugar (N 41.860283, O 87.630733) fue escogido por ellos, por considerarse un nudo ferroviario importante, cerca del centro Chicago y nosotros coincidimos con el criterio de elección. El escenario de Chicago es un lugar real, pero la liberación es puramente hipotética. Como puede apreciarse en la Figura 29, este escenario dispone de un terreno plano y abierto entorno a la fuente de emisión, compuesto generalmente de hierbas, árboles y arbustos, y zonas de arena / grava. Dentro del escenario propuesto se encuentra además al río Chicago ubicado a unos 300 m al oeste de la fuente de emisión. Como situación, se presenta una fuga de cloro desde un tanque de un tren de carga a través de un orificio de 10 cm de diámetro. La presión del tanque se asume de 689.48 KPa y la temperatura ambiente de 25 °C. Bajo las condiciones mencionadas, diferentes fórmulas de emisión han sido aplicadas al escenario con el resultado de un rango de tasa de emisión de 150 a 250 kg s⁻¹. Para los propósitos del ejercicio y una adecuada representación de los resultados, se asume una tasa de liberación de 225 kg s⁻¹ de cloro, durante 5 minutos. Más detalles del escenario de Chicago se pueden encontrar en el trabajo de Hanna et al. ⁽⁵⁶⁾.

A los efectos de este estudio se supone, para la simulación, condiciones atmosféricas muy estables y vientos ligeros de 3 m s⁻¹. Dos escenarios fueron estudiados: el escenario 1 (ver Figura 29a), en el que la nube se transporta hacia el norte, rumbo a una región densamente edificada, caracterizada por edificios altos, con una densidad poblacional de aproximadamente 3949 individuos km⁻¹; y el escenario 2 (ver Figura 29b), en el que la nube se transporta hacia el oeste a través de un área comercial/residencial, con una densidad poblacional de aproximadamente 6072 individuos km⁻¹. ⁽¹¹⁵⁾ El escenario 1 se representa sobre un mallado de 5 km N-S por 2.5 km E-O, mientras que el escenario 2 sobre uno de 2 km N-S por 4.5 km E-O.

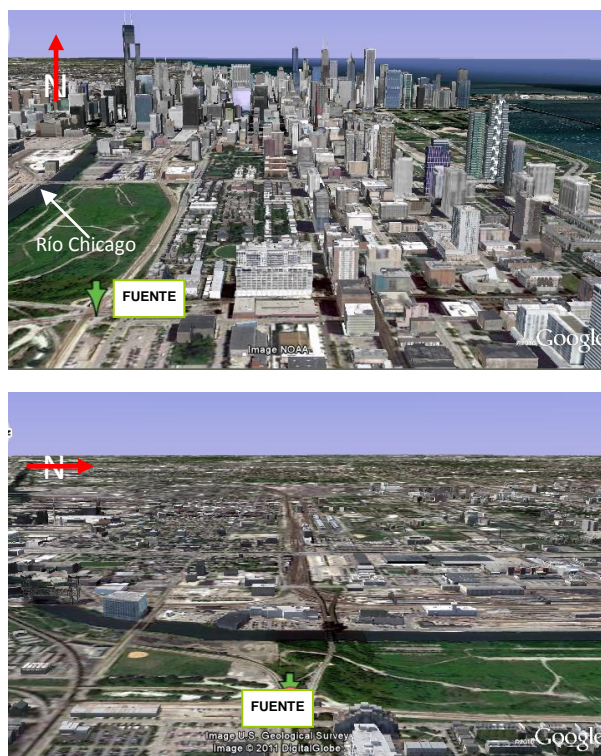


FIGURA 29: VISTA SATELITAL DE LOS ESCENARIOS 1 (A) Y 2 (B). EN LA PRIMERA SE VISUALIZA AL NUDO FERROVIARIO CON VISTA AL NORTE. EN LA MISMA IMAGEN SE APRECIA AL RÍO CHICAGO A LA IZQUIERDA DE LA FUENTE, Y LA PRESENCIA DE EDIFICIOS ALTOS HACIA EL NORTE. EN (B) SE VISUALIZA AL MISMO NUDO PERO CON VISTA AL OESTE. EN ESTA IMAGEN ES APRECIABLE EL PREDOMINIO DE CONSTRUCCIONES DE BAJA ALTURA Y EL RÍO CHICAGO, TRANSVERSAL A LA DIRECCIÓN DEL VIENTO ASUMIDA EN ESTE ESCENARIO. FUENTE: GOOGLE MAPS, 2011.

Celdas de dimensiones de 6 m de ancho por 2 m de altura son consideradas cerca de la fuente al inicializarse la nube de cloro; sin embargo el volumen de las celdas se incrementa en la medida que nos alejamos de la fuente de emisión. Cabe mencionar que un mayor número de celdas son necesarias para el escenario 1 debido a que la nube encuentra a su paso una región densamente edificada con construcciones muy elevadas: 900 mil celdas son usadas para el escenario 1, mientras que 450 mil son necesarias para el escenario 2. La resolución temporal escogida para la simulación es de 30 s.

La especie química de interés en este artículo es el cloro y su elección fue motivada por varias razones. En principio, el cloro es uno de los productos químicos más utilizados a nivel industrial, su reactividad puede complicar el transporte en la atmósfera y la dispersión desde la fuente, y además dada su densidad (2.5 veces más pesado que el aire) forma una nube densa que en su desplazamiento permanece cerca del suelo. Debido a la presencia de edificios y otras estructuras, esta última característica requiere de algoritmos más complejos para una adecuada predicción.

2.2.1.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Hanna et al. ⁽⁵⁶⁾ muestran en su trabajo representaciones tridimensionales de las simulaciones de FLACS para los escenarios propuestos. En las Figuras 30 y 31 se muestran representaciones gráficas bidimensionales del acoplamiento FLACS-DDC correspondientes a los escenarios 1 y 2, respectivamente, para los tiempos de simulación de 200, 400, 800, 1200, 1600 y 2000 s. Estas gráficas muestran las regiones limitadas por 0.31 ppm.

2.2.1.4.1 ANÁLISIS DESCRIPTIVO

Los resultados de la simulación mostraron que, para el escenario 1 (ver Figura 30), la nube de cloro se desplaza a mayor velocidad y con menor dilución a través de un terreno plano y abierto, extendiéndose más de 1000 m desde la fuente de emisión en la dirección del viento durante los primeros 400 s. Cuando la nube encuentra en su trayectoria al área densamente edificada, su extensión a sotavento se ve limitada debido a que la mezcla turbulenta (característica de terrenos complejos y zonas con edificaciones altas) contribuye a la disminución de la concentración local. Del mismo modo se observa que un volumen de gas queda atrapado al sudeste, entre los edificios elevados que actúan como área de atrapamiento⁷, aún para tiempos avanzados de simulación.

Si bien la presencia del viento sur en este escenario puede sugerir un movimiento rectilíneo de la nube, el desplazamiento observado hacia la derecha en la Figura 31 se corresponde con la presencia de edificios de menor talla al este, permitiendo que la nube siga su trayectoria con menor dilución sobre la región. Las regiones de daño reflejan esta situación restringiendo la extensión de la mayor proporción del frente de las regiones maximal y minimal a unos 2500-3000 m a favor del viento (distancia a la cual predominan los edificios de gran altura).

Para el escenario 2, como muestra la Figura 31, la nube de cloro se extiende alrededor del 45% más que en el escenario 1. Esto ocurre porque la nube experimenta menos mezcla turbulenta, y en consecuencia una menor dilución debida a las edificaciones de menor altura que encuentra en su trayectoria. Por otro lado, la simulación representa muy bien los efectos asociados al cauce del río Chicago mediante la extensión lateral de la nube. Esto último se

⁷ Área de atrapamiento: región en la cual la concentración de la especie química analizada permanece elevada y perdurable, en función de las condiciones atmosféricas y estructurales del entorno, que impiden su dispersión.

visualiza con mayor claridad en la representación de las regiones maximal ya que mantienen su forma con la evolución del tiempo.

Para este escenario, la trayectoria de la nube se dirige al suroeste, probablemente debido a la pendiente natural del terreno que por tratarse de una nube densa tiende a adoptar la topografía del mismo.

Como muestran la Figura 30 y la Figura 31, las simulaciones de DDC (segunda y tercera columna) representan regiones de acuerdo a una escala de nivel de daño (ND). La escala de grises situada a la derecha de cada gráfica nos permite estimar la magnitud de los daños. Un valor de ND tal que $0 \leq ND < 1$ representan niveles de exposición que producen ligero olor, sabor u otra irritación sensorial leve. Si $1 \leq ND < 2$, la población en general, incluyendo a las personas susceptibles como los lactantes, niños, ancianos, personas con asma, y aquellas con otras enfermedades, podría experimentar molestias notables, irritación o ciertos efectos asintomáticos. Estos efectos son transitorios y reversibles una vez que cesa la exposición. Si $2 \leq ND < 3$, la población mencionada podría experimentar efectos duraderos serios o irreversibles o ver impedida su capacidad para escapar, y si $ND = 3$, puede experimentar efectos amenazantes para la vida o incluso provocar la muerte.

Las representaciones de las regiones minimal (segunda columna) y maximal (tercera columna) en las Figura 30 y en Figura 31, permiten reconocer los valores extremos del daño esperado y al mismo tiempo asumir que el ND esperado se hallará entre dichos valores. Durante la evolución de la nube tóxica esta diferencia entre el máximo y el mínimo suele ser pequeña, y el valor medio se aproxima al valor de daño esperado. En la situación posterior al paso de la nube en donde el valor mínimo disminuye significativamente, alejándose del valor máximo, sólo podemos afirmar que el nivel de daño está comprendido entre las cotas maximal y minimal. Este decrecimiento es claramente observado en la región minimal simulada para los 800- 2000 s del escenario 1 (Figura 30) y para 1200-2000 s del escenario 2 (Figura 31), donde las regiones parecen desvanecerse debido al decrecimiento en el nivel de daño en sectores que ya han sido atravesados por la nube tóxica.

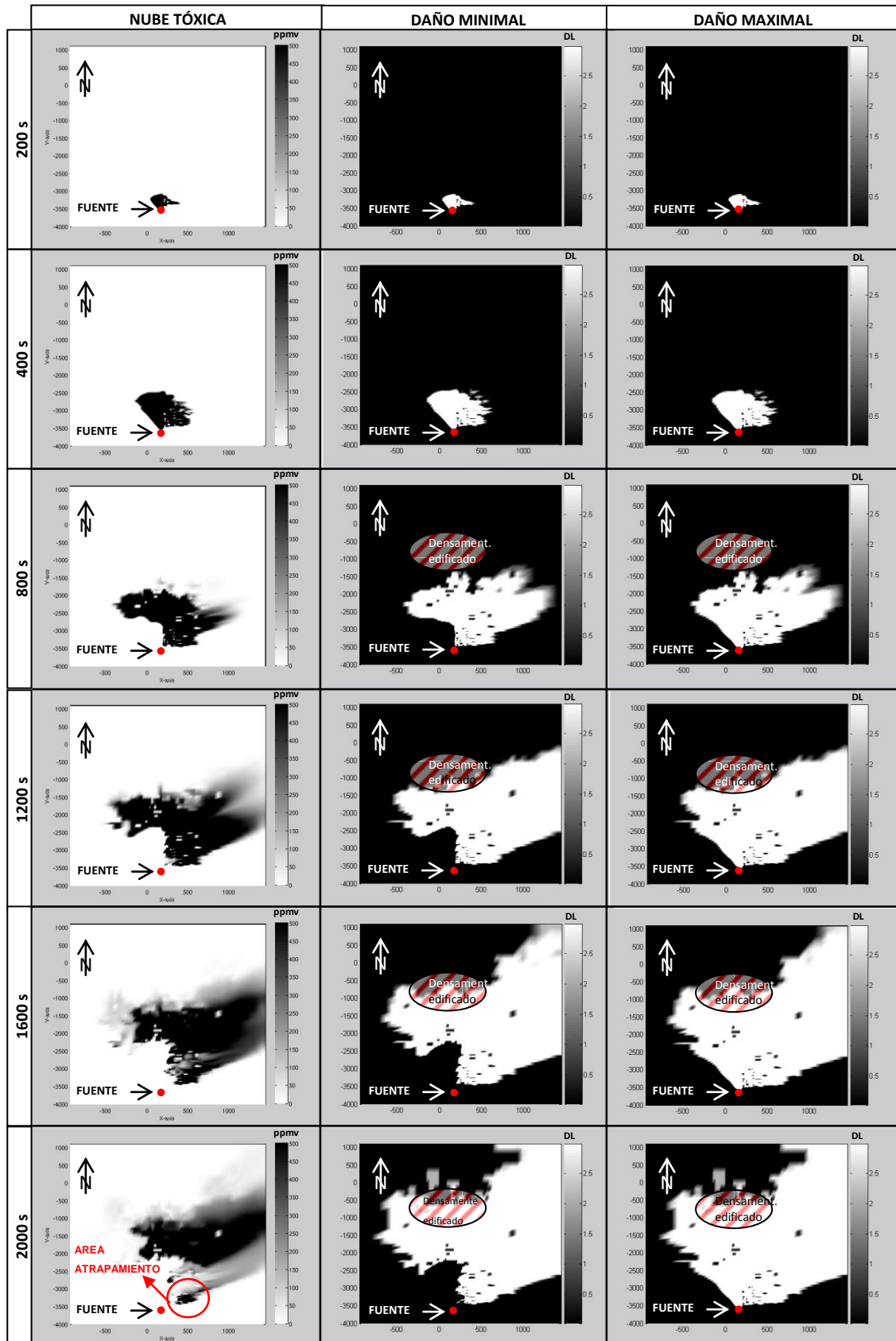


FIGURA 30: FLACS- DDC. REPRESENTACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE LA NUBE TÓXICA Y DE LAS REGIONES DE RIESGO GENERADAS POR DDC PARA EL ESCENARIO 1 DE CHICAGO (VIENTO SUR), DONDE 0.31 PPMV ES LA CONCENTRACIÓN QUE DELIMITA A LA NUBE Y A LAS REGIONES, PARA T= 200, 400, 800, 1200, 1600 Y 2000 S.

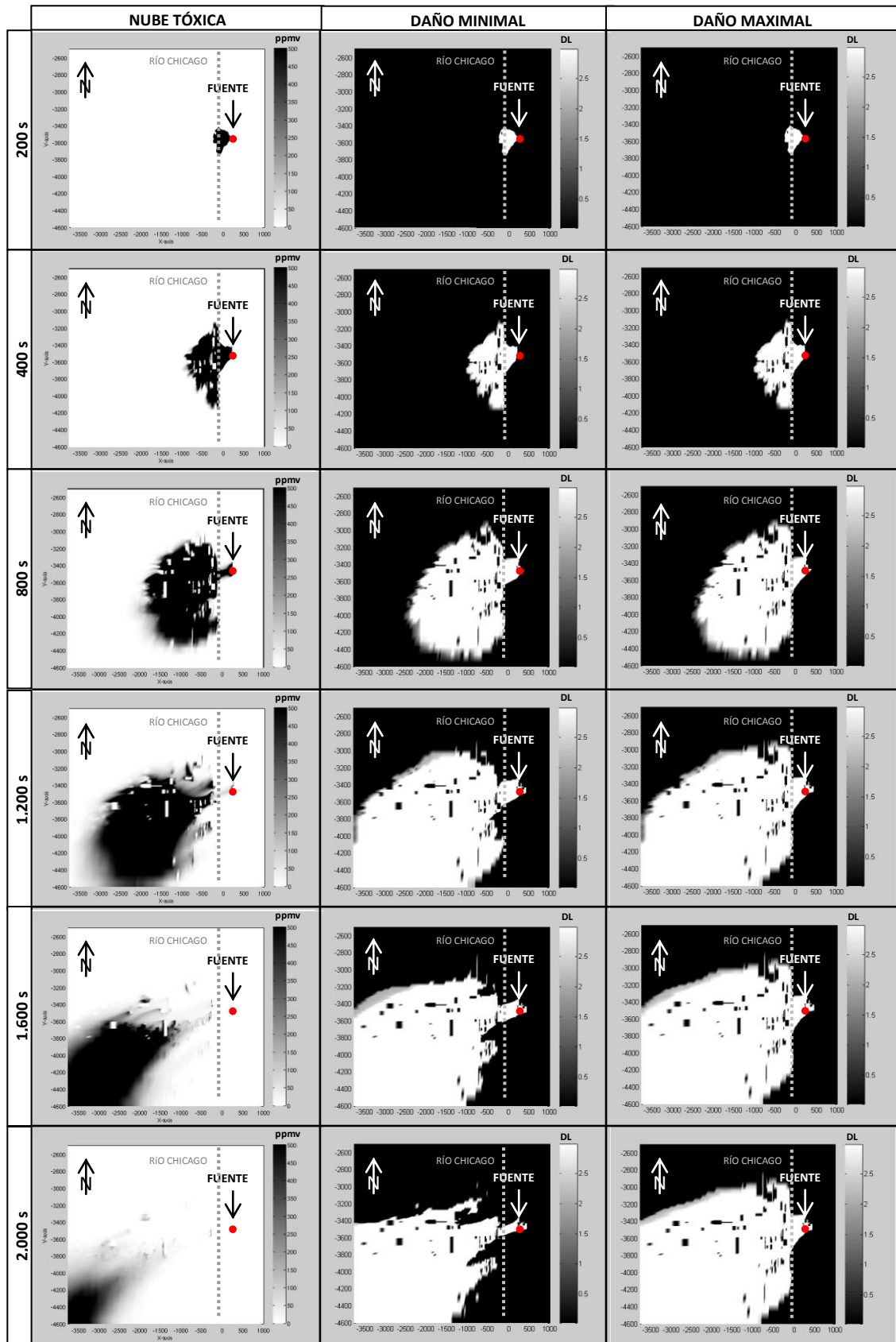


FIGURA 31: FLACS- DDC. REPRESENTACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE LA NUBE TÓXICA Y DE LAS REGIONES DE RIESGO GENERADAS POR DDC PARA EL ESCENARIO 2 DE CHICAGO (VIENTO ESTE), DONDE 0.31 PPMV ES LA CONCENTRACIÓN QUE DELIMITA A LA NUBE Y A LAS REGIONES, PARA T= 200, 400, 800, 1200, 1600 Y 2000 S.

2.2.1.5 ANÁLISIS CUANTITATIVO

Es importante destacar el beneficio que acarrea, para los respondedores a un incidente químico, el conocimiento no sólo de la evolución de la nube tóxica sino también de la dinámica de las regiones de afectación. Esta información se completa cuando es posible conocer cuántas personas han sido potencialmente afectadas y la gravedad de esta afectación. Como bien mencionamos en la sección 2.2.1.4.1, DDC permite estimar esta gravedad a través del ND. A fin de mostrar estas bondades que presenta DDC para el análisis de riesgo, hemos optado en este trabajo por considerar los datos poblacionales de Chicago del censo del 2000, ⁽¹¹⁰⁾ discriminando la población por barrios, pero asumiendo una distribución poblacional hipotética en base a las características de los mismos.

La simulación para el escenario 1 alcanzó parcialmente al barrio Near South Side y completamente al barrio Loop, mientras que para el escenario 2, los barrios de Near South Side, Near West Side y Lower West Side se vieron parcialmente afectados. En la tabla 10 se muestra las características de los barrios en cuestión: Población, densidad poblacional y área de cobertura.

TABLA 10: POBLACIÓN, DENSIDAD POBLACIONAL Y ÁREA DE COBERTURA DE LOS BARRIOS DE CHICAGO ALCANZADOS POR EL INCIDENTE DE CLORO. FUENTE: WENDELL COX CONSULTANCY. ⁽¹¹⁰⁾

BARRIO	2000	Densidad 2000	Área (Km ²)
Loop	16.388	10.243	4.14
Lower West Side	44.031	15.725	7.25
Near South Side	9.509	5.283	4.66
Near West Side	46.419	8.144	14.76

En las tablas 11 y 12 se presentan las dimensiones de las regiones maximal y minimal, y la población afectada por la nube de cloro bajo diferentes rangos de ND, para los distintos tiempos de evolución de la simulación.

TABLA 11: ÁREA DE COBERTURA Y POBLACIÓN SUBYACENTE DE LAS REGIONES MAXIMAL Y MINIMAL, DE ACUERDO A RANGOS DE NIVEL DE DAÑO, DEL ESCENARIO 1.

TIEMPO (s)	Nivel de daño (ND)	REGIÓN MAXIMAL		REGIÓN MINIMAL	
		Área cobertura (Km ²)	Población (individuos)	Área cobertura (Km ²)	Población (individuos)
200	1<=ND<2	0.003	12	0.002	11
	2<=ND<3	0.005	23	0.005	23
	ND=3	0.082	389	0.082	390
	TOTAL	0.090	424	0.090	423
400	1<=ND<2	0.034	147	0.033	143
	2<=ND<3	0.028	121	0.028	118
	ND=3	0.487	2084	0.485	2074
	TOTAL	0.550	2352	0.546	2335
800	1<=ND<2	0.288	894	0.282	873
	2<=ND<3	0.106	327	0.087	270
	ND=3	2.040	6320	1.900	5887
	TOTAL	2.434	7541	2.269	7030
1200	1<=ND<2	0.083	254	0.080	244
	2<=ND<3	0.168	516	0.159	486
	ND=3	4.000	12274	3.720	11415
	TOTAL	4.251	13044	3.958	12146
1600	1<=ND<2	0.063	178	0.060	170
	2<=ND<3	0.319	906	0.405	1149
	ND=3	5.370	15236	4.890	13874
	TOTAL	5.752	16320	5.355	15193
2000	1<=ND<2	0.003	8	0.000	0
	2<=ND<3	0.364	940	0.414	1070
	ND=3	6.250	16153	5.720	14783
	TOTAL	6.617	17101	6.134	15852

Una primera mirada de la Figura 30 y la Figura 31, y de las tablas 11 y 12, nos muestra que para cualquier tiempo de simulación, indistintamente del escenario, predomina el mayor nivel de daño: ND 3 (superior al 85 % de las superficies de las regiones maximal y minimal), asociado a efectos graves en la salud, e incluso la muerte. Tal situación se encuentra directamente relacionada con la magnitud de la liberación de cloro. A partir de esta conclusión es que enfocaremos la discusión de resultados a la superficie total de las regiones maximal y minimal, sin discriminar en función del nivel de daño aún cuando en las tablas 11 y 12 se encuentre detallada esta información.

Como bien mencionamos en la sección anterior, dadas las características propias del escenario 2, la nube de cloro avanza con mayor velocidad que en el escenario 1 y consecuentemente

recorre más distancia para el mismo tiempo de simulación. Esto se refleja, por un lado, en la dinámica de las regiones de daño, ya que la brecha entre las superficies de cobertura de las regiones maximal y minimal para el escenario 2 es mayor (y se acentúa cuando avanza el tiempo de simulación) que para el escenario 1 (Ver Figura 32a), donde las concentraciones cerca de la fuente permanecen altas aún para los 2000 s de simulación.

TABLA 12: ÁREA DE COBERTURA Y POBLACIÓN SUBYACENTE DE LAS REGIONES MAXIMAL Y MINIMAL, DE ACUERDO A RANGOS DE NIVEL DE DAÑO, DEL ESCENARIO 2.

TIEMPO (s)	Nivel de daño (ND)	REGIÓN MAXIMAL		REGIÓN MINIMAL	
		Área cobertura (Km ²)	Población (individuos)	Área cobertura (Km ²)	Población (individuos)
200	1<=ND<2	0.003	10	0.003	9
	2<=ND<3	0.004	14	0.004	14
	ND=3	0.084	291	0.084	291
	TOTAL	0.091	315	0.091	315
400	1<=ND<2	0.038	120	0.039	121
	2<=ND<3	0.063	198	0.063	197
	ND=3	0.547	1716	0.543	1702
	TOTAL	0.649	2033	0.644	2020
800	1<=ND<2	0.254	1035	0.236	961
	2<=ND<3	0.107	437	0.097	397
	ND=3	2.443	9962	2.395	9769
	TOTAL	2.804	11434	2.728	11126
1200	1<=ND<2	0.095	424	0.089	397
	2<=ND<3	0.205	913	0.165	736
	ND=3	4.820	21460	4.610	20525
	TOTAL	5.120	22797	4.864	21658
1600	1<=ND<2	0.016	67	0.009	41
	2<=ND<3	0.267	1152	0.163	702
	ND=3	5.120	22067	4.480	19308
	TOTAL	5.403	23286	4.652	20051
2000	1<=ND<2	0.006	26	0.000	0
	2<=ND<3	0.251	1089	0.013	55
	ND=3	5.160	22412	3.900	16940
	TOTAL	5.417	23528	3.913	16995

Por otro lado, como se observa en la Figura 32b a partir de los 1200 s de simulación, la tasa de crecimiento de la superficie de la región maximal del escenario 2 disminuye y esto se debe a que para dicho tiempo de simulación la nube de cloro alcanza el contorno del mallado cartesiano propuesto (ver Figura 31). Finalmente, en la tabla 12 se observa resaltado el mayor valor de superficie alcanzado por la región minimal a los 1200 s de simulación en el escenario 2. A partir de ese momento, la superficie de la región minimal comienza a decrecer y la brecha

entre la maximal y minimal aumenta, influyendo en la precisión al estimar la población potencialmente afectada. Para una mejor visualización de las conclusiones mencionadas en este párrafo citaremos a la población afectada para los 1200 y 2000 s de simulación en el escenario 2 (ver tabla 12). Si bien la superficie de la región maximal, del mismo modo que la población afectada, no varía significativamente a partir de los 1200 s de simulación, no ocurre lo mismo con la región minimal ya que la nube de cloro se está retirando del escenario. Es así como podemos afirmar que para los 1200 s al menos 21658 (y como máximo 22797) personas se verán potencialmente afectadas por la nube de cloro, mientras que para los 2000 s al menos 16995 (y como máximo 23527) personas la experimentarán.

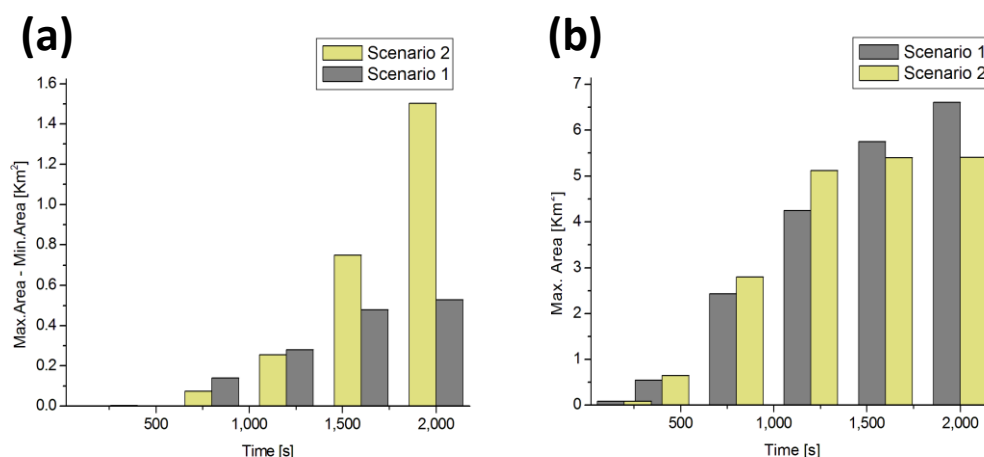


FIGURA 32: ANÁLISIS DE SUPERFICIES DE REGIONES MAXIMAL Y MINIMAL. (A) DIFERENCIA ENTRE LAS DIMENSIONES AREALES DE LAS REGIONES MAXIMAL Y MINIMAL EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE SIMULACIÓN, PARA AMBOS ESCENARIOS. (B) COMPARACIÓN DE LAS DIMENSIONES AREALES DE LAS REGIONES MAXIMAL EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE SIMULACIÓN.

Finalmente en la Figura 33a se presenta un análisis de la población afectada para los escenarios en cuestión. A tal fin, se propone una variable denominada

$$\text{Población relativa} = \frac{\text{Población afectada}_i}{\text{Población máxima afectada}}; \text{ donde } i = 200, 400, 800, 1200, 1600 \text{ y } 2000 \text{ es el}$$

tiempo de simulación. A través de esta variable se observa cómo el desarrollo de la nube de cloro se ve influenciada por la distribución local de los edificios, es así que la tasa de crecimiento de la población afectada de la Figura 33b decrece a partir de los 1200 s para el escenario 1 (tiempo en el que alcanza el área densamente edificada, caracterizada con edificios altos). Para el escenario 2, se observa una tasa creciente y sostenida (mayor que en el escenario 1) hasta los 1200 s que es el tiempo en el que se alcanza los límites del mallado

cartesiano. De no haber existido este límite, se estima que la tasa de crecimiento se hubiese mantenido por las características del terreno y por la magnitud del escape que requiere más distancia y tiempo para diluir la nube. Por último, en la Figura 33a se presenta comparativamente el número de individuos potencialmente afectado para ambos escenarios. Es claro en la gráfica que mayor población será afectada por la nube de cloro en el escenario 2 que en el 1. Esta conclusión está directamente relacionada con la mayor densidad poblacional que hay en el escenario 2 respecto al escenario 1, ya que si se observa en la tablas 11 y 12 el área de cobertura final para el escenario 2 (5.417 Km²) es menor que para el escenario 1 (6.617 Km²).

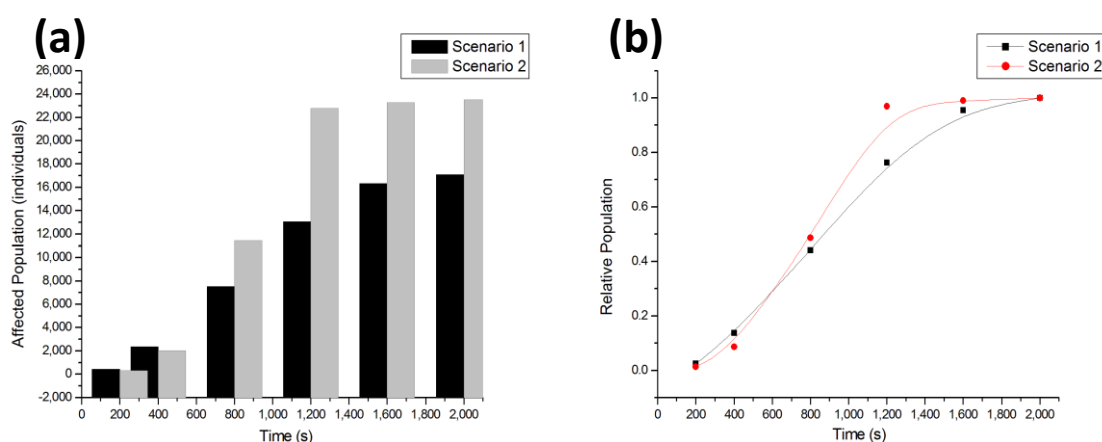


FIGURA 33: ANÁLISIS DE POBLACIÓN AFECTADA. (A) POBLACIÓN POTENCIALMENTE AFECTADA EN ESCENARIOS 1 Y 2, EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE EVOLUCIÓN DE LA NUBE DE CLORO. (B) COMPARACIÓN DE LA POBLACIÓN RELATIVA, POTENCIALMENTE AFECTADA, EN LOS ESCENARIOS 1 Y 2. Población relativa= $\frac{\text{Población afectada}_i}{\text{Población máxima afectada}}$ DONDE $i= 200, 400, 800, 1200, 1600$ Y 2000 ES EL TIEMPO DE SIMULACIÓN.

Esta información cuantitativa, junto a las representaciones gráficas de las regiones de daño y de la evolución de la nube tóxica como se muestran en las Figura 34 a 37, constituyen una interesante herramienta para el análisis de riesgo. Conocer en forma temporal cuántas personas son potencialmente afectadas y en qué nivel, ofrece a los decisores en una emergencia química las herramientas para sacar conclusiones acerca de cuánto tiempo se dispone para evacuar a aquellos individuos que en el futuro inmediato serán alcanzados por la nube tóxica, cuánta población necesitará de atención médica inmediata de acuerdo al grado de afectación y de cuánta logística se requerirá disponer para responder a la emergencia, entre otras cosas.

El aprovechamiento de las ventajas que ofrece esta herramienta va de la mano de la necesidad de contar con información poblacional completa y actualizada de los escenarios de estudio, de modo de representar adecuadamente la situación.

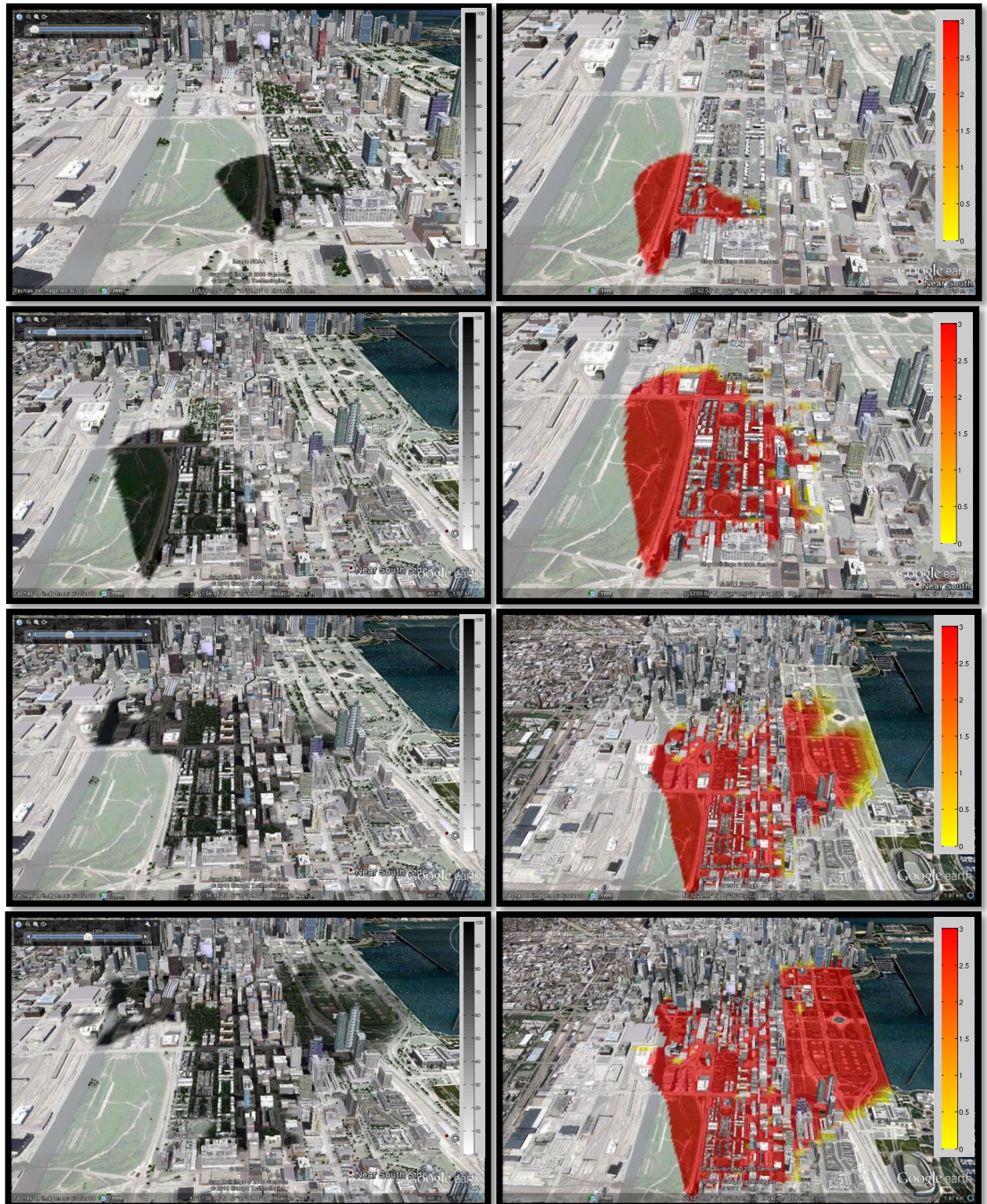


FIGURA 34: FLACS-DDC. REPRESENTACIÓN DE LA EVOLUCION DE LA NUBE TÓXICA (PRIMERA COLUMNA) Y DE LAS REGIONES DE DAÑO MAXIMAL (SEGUNDA COLUMNA) PARA EL ESCENARIO 1 DE CHICAGO SOBRE UNA IMAGEN SATELITAL PROPORCIONA POR GOOGLE EARTH, 2011. TIEMPOS DE SIMULACIÓN: 200, 400, 800 Y 1200 SEGUNDOS.

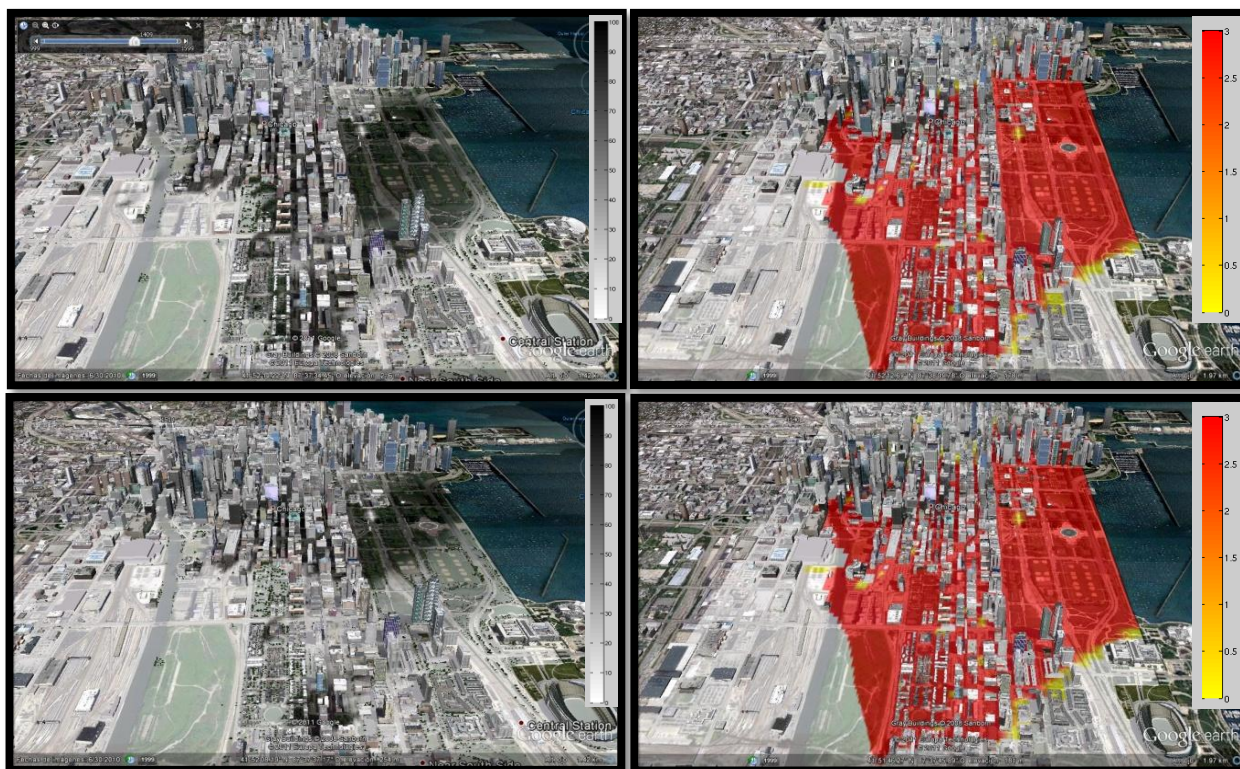


FIGURA 36: FLACS-DDC. REPRESENTACIÓN DE LA EVOLUCION DE LA NUBE TÓXICA (PRIMERA COLUMNA) Y DE LAS REGIONES DE DAÑO MAXIMAL (SEGUNDA COLUMNA) PARA EL ESCENARIO 1 DE CHICAGO SOBRE UNA IMAGEN SATELITAL PROPORCIONA POR GOOGLE EARTH, 2011. TIEMPOS DE SIMULACIÓN: 1600 Y 2000 SEGUNDOS.



FIGURA 35: FLACS-DDC. REPRESENTACIÓN DE LA EVOLUCION DE LA NUBE TÓXICA (PRIMERA COLUMNA) Y DE LAS REGIONES DE DAÑO MAXIMAL (SEGUNDA COLUMNA) PARA EL ESCENARIO 2 DE CHICAGO SOBRE UNA IMAGEN SATELITAL PROPORCIONA POR GOOGLE EARTH, 2011. TIEMPOS DE SIMULACIÓN: 200 Y 400 SEGUNDOS.

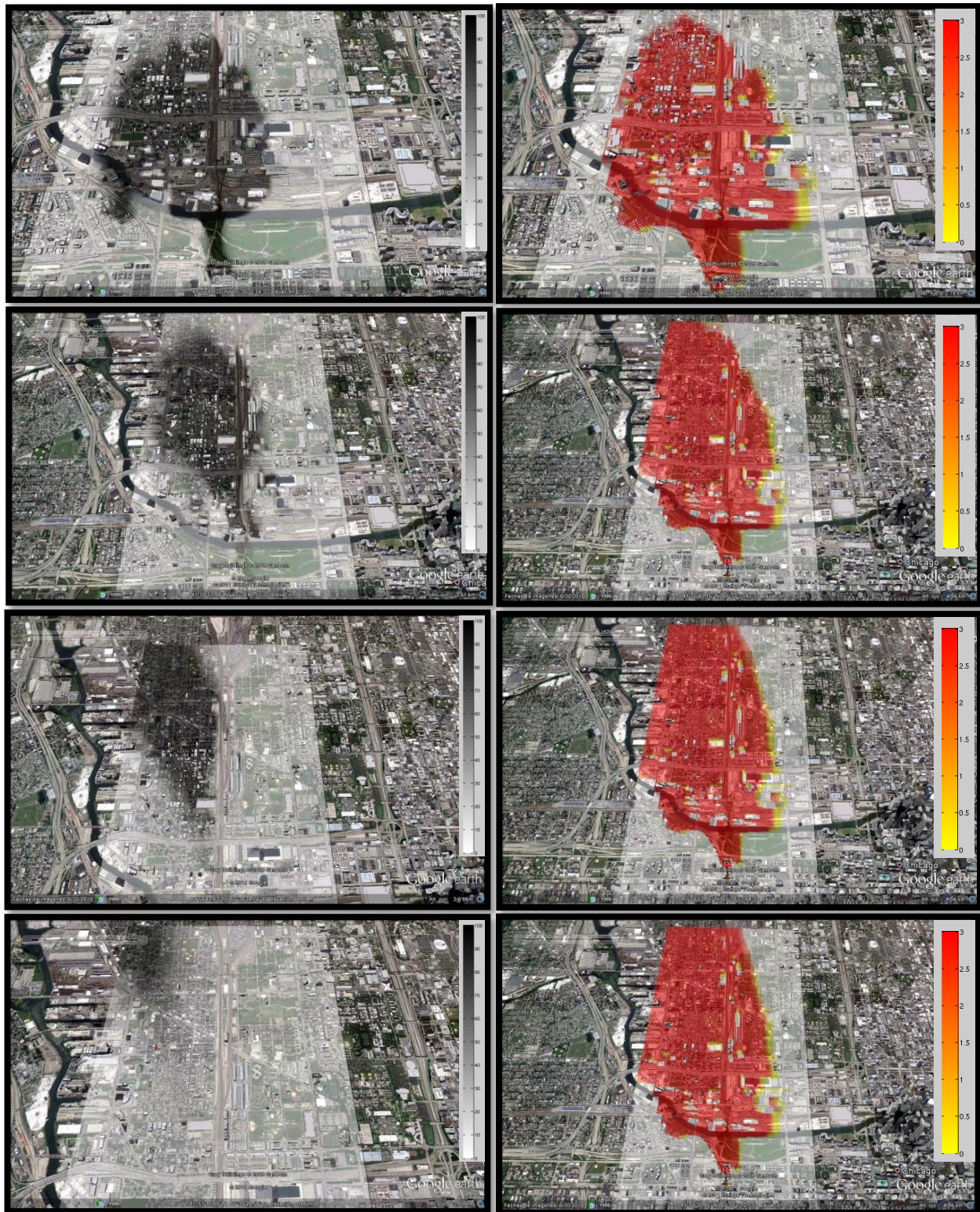


FIGURA 37: FLACS-DDC. REPRESENTACIÓN DE LA EVOLUCION DE LA NUBE TÓXICA (PRIMERA COLUMNA) Y DE LAS REGIONES DE DAÑO MAXIMAL (SEGUNDA COLUMNA) PARA EL ESCENARIO 2 DE CHICAGO SOBRE UNA IMAGEN SATELITAL PROPORCIONA POR GOOGLE EARTH, 2011. TIEMPOS DE SIMULACIÓN: 800, 1200, 1600 Y 2000 SEGUNDOS.

2.2.1.6 LIMITACIONES DEL ACOPLAMIENTO DDC-FLACS

El acoplamiento propuesto resulta de gran interés para la etapa de planificación de emergencias dado el gran nivel de detalle que puede ofrecer de los escenarios en forma temporal. Sin embargo, el compromiso que existe entre dicho nivel de detalle y el costo computacional hace que resulte complicado obtener este tipo de resultados en una emergencia en tiempo real. Por otra parte, un resultado de tales características requiere de información de entrada de cantidad y calidad, la cual no siempre está disponible. Una vez más, enfatizaremos en la necesidad de mejorar, actualizar y completar las bases de datos que requieren los modelos, tanto de distribución de contaminantes como los de exposición, ya que la optimización de ellos no alcanza si no se avanza en la mejora de la información disponible.

Vale señalar, por último, que las simulaciones presentadas en esta sección no han incluido a los efectos de los sumideros, por lo que las concentraciones previstas estén probablemente sobreestimadas.

2.2.2 ACOPLAMIENTO DE DDC CON UN MODELO DE DISPERSIÓN EN AIRE SIMPLE

En esta sección se aplicará el modelo de transporte desarrollado en el capítulo 2, acoplado al modelo DDC, al escenario de Chicago ya presentado en la sección 2.2.1. Los datos de entrada requeridos por el modelo simple fueron consultados en la mencionada sección.

Al comparar las Figura 38 y 39 con las Figura 34 y 35 se observa que, si bien ambas simulaciones muestran velocidades de avance similares, el modelo simple representa a la nube como un “puff” que se desplaza sin interacción con los obstáculos, con el terreno y con la naturaleza turbulenta de la atmósfera. Para tiempos avanzados de simulación, es clara la diferencia entre las formas de las nubes tóxicas: entre ellas se percibe, en la Figura 39, la ausencia de la zona de atrapamiento de la Figura 36, y del movimiento forzado por pendiente y de la interacción con la región densamente urbanizada de edificios altos.

En la Tabla 13 se muestran los valores areales de las regiones maximal. Como bien se mencionó, estos valores dan una idea cuantitativa de las regiones de riesgo sobre las que hay que actuar.

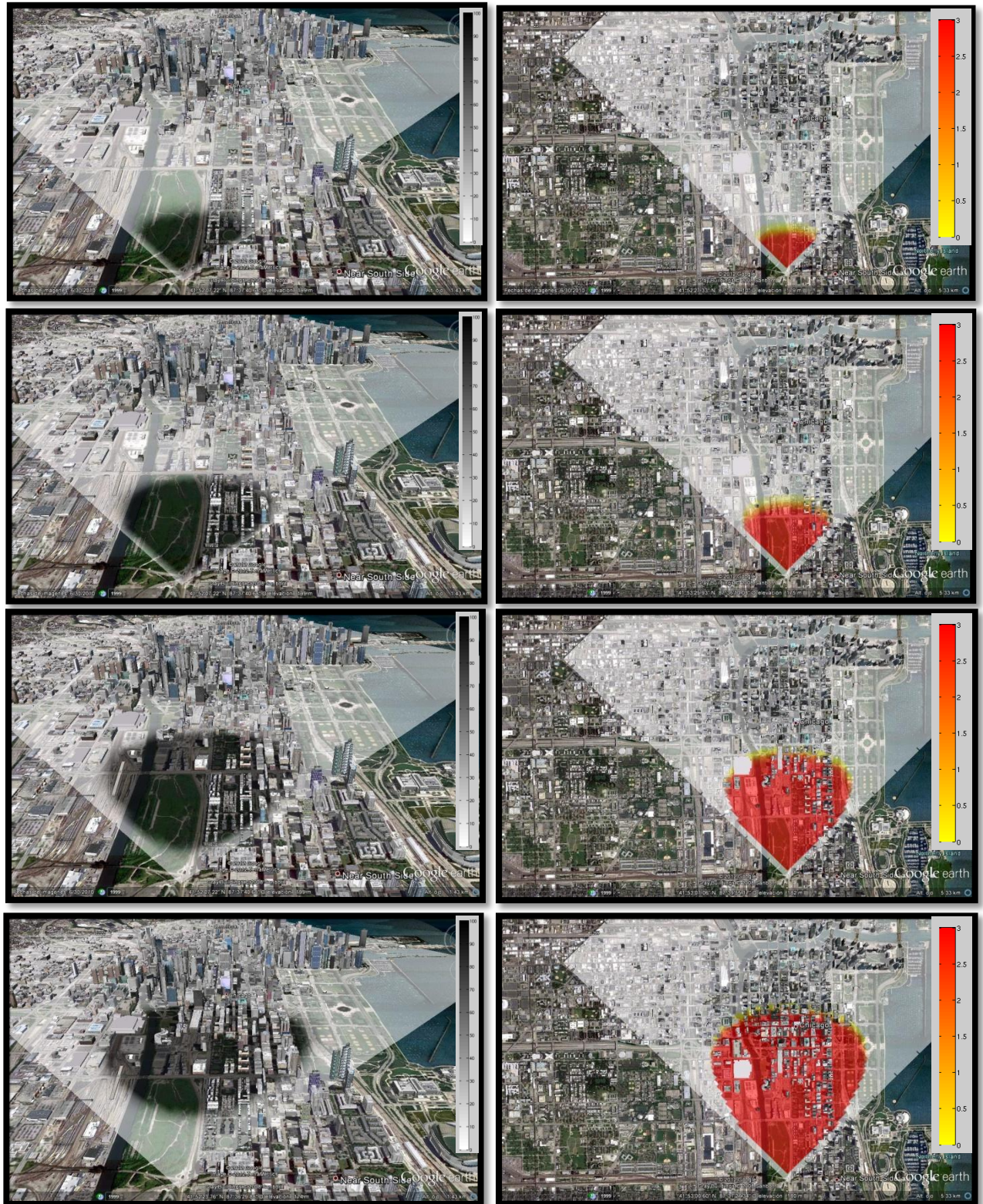


FIGURA 38: MODELO SIMPLE-DDC. REPRESENTACIÓN DE LA EVOLUCION DE LA NUBE TÓXICA (PRIMERA COLUMNA) Y DE LAS REGIONES DE DAÑO MAXIMAL (SEGUNDA COLUMNA) PARA EL ESCENARIO 1 DE CHICAGO SOBRE UNA IMAGEN SATELITAL PROPORCIONA POR GOOGLE EARTH, 2011. TIEMPOS DE SIMULACIÓN: 200, 400, 800 Y 1200 SEGUNDOS.

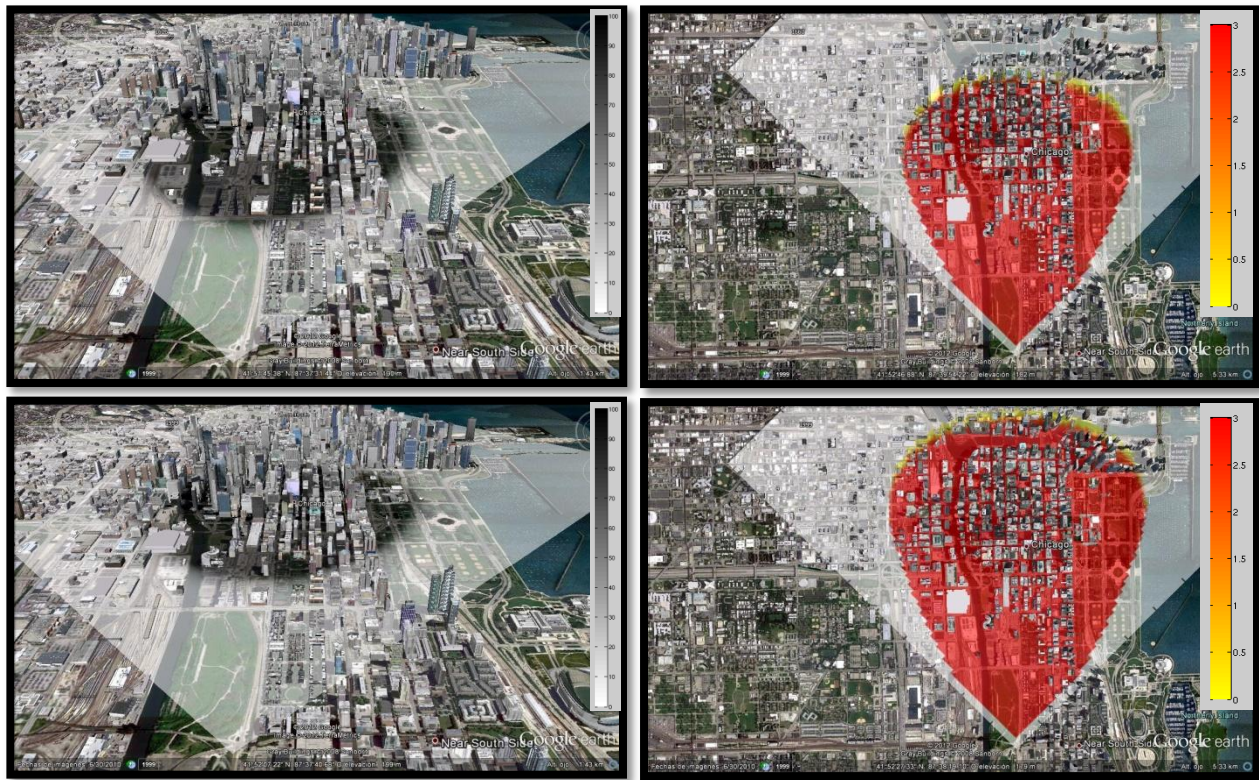


FIGURA 39: MODELO SIMPLE-DDC. REPRESENTACIÓN DE LA EVOLUCION DE LA NUBE TÓXICA (PRIMERA COLUMNA) Y DE LAS REGIONES DE DAÑO MAXIMAL (SEGUNDA COLUMNA) PARA EL ESCENARIO 1 DE CHICAGO SOBRE UNA IMAGEN SATELITAL PROPORCIONA POR GOOGLE EARTH, 2011. TIEMPOS DE SIMULACIÓN: 1600 Y 2000 SEGUNDOS.

TABLA 13: ÁREA DE COBERTURA DE LAS REGIONES DE DAÑO MAXIMAL PARA LOS TIEMPOS DE SIMULACIÓN DE 200, 400, 800, 1200 Y 1600 SEGUNDOS.

TIEMPO (s)	Nivel de daño (ND)	REGIÓN MAXIMAL	REGIÓN MINIMAL
		Área cobertura (Km ²)	Área cobertura (Km ²)
200	1<=ND<2	0.08	0.07
	2<=ND<3	0.03	0.04
	ND=3	0.29	0.29
	TOTAL	0.4	0.4
400	1<=ND<2	0.13	0.03
	2<=ND<3	0.04	0.14
	ND=3	0.73	0.73
	TOTAL	0.9	0.9
800	1<=ND<2	0	0
	2<=ND<3	0.22	0.21
	ND=3	1.87	1.88
	TOTAL	2.09	2.09
1200	1<=ND<2	0	0
	2<=ND<3	0.26	0.25

	ND=3	3.23	3.14
	TOTAL	3.49	3.39
1600	1<=ND<2	0	0
	2<=ND<3	0.26	0.25
	ND=3	4.77	4.4
	TOTAL	5.03	4.65
2000	1<=ND<2	0	0
	2<=ND<3	0.26	0.24
	ND=3	6.43	5.66
	TOTAL	6.69	5.9

Si comparamos las áreas de cobertura de las simulaciones con FLACS y con el modelo simple, como se hace en la Figura 40: Comparación de las áreas de cobertura de las regiones maximal, dadas por las simulaciones con FLACS y con el modelos simple. y en la Figura 41, vemos que hasta los 400 s, tanto para la aproximación maximal como para la minimal, el modelo simple sostiene un valor mayor de cobertura respecto a FLACS. Sin embargo, con el avance del tiempo de simulación, esta situación se invierte debido a la mayor capacidad descriptiva de FLACS y su consecuente avance frontal y lateral: la nube simulada con este modelo comienza a dispersarse entre las calles y a avanzar por lugares que el modelo simple no puede representar.

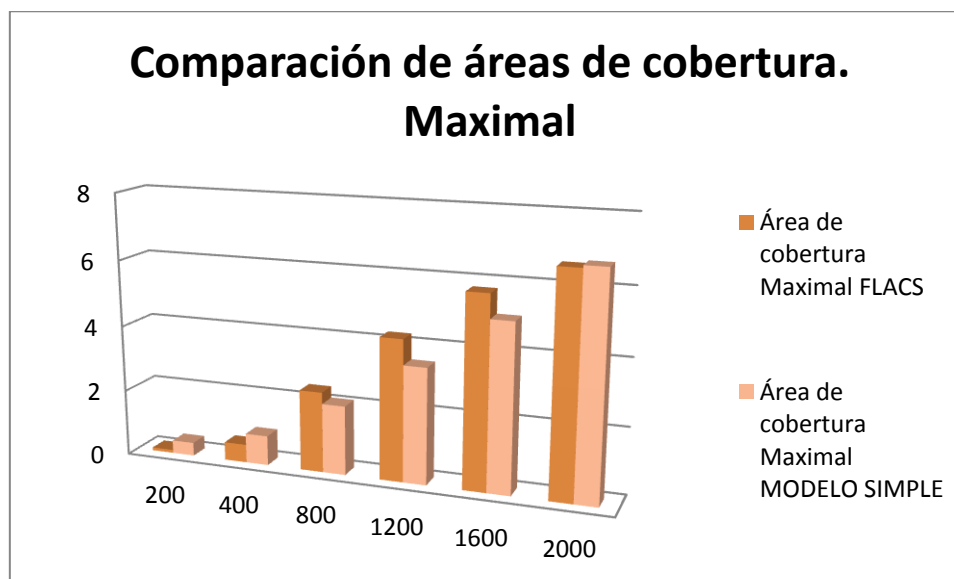


FIGURA 40: COMPARACIÓN DE LAS ÁREAS DE COBERTURA DE LAS REGIONES MAXIMAL, DADAS POR LAS SIMULACIONES CON FLACS Y CON EL MODELOS SIMPLE.

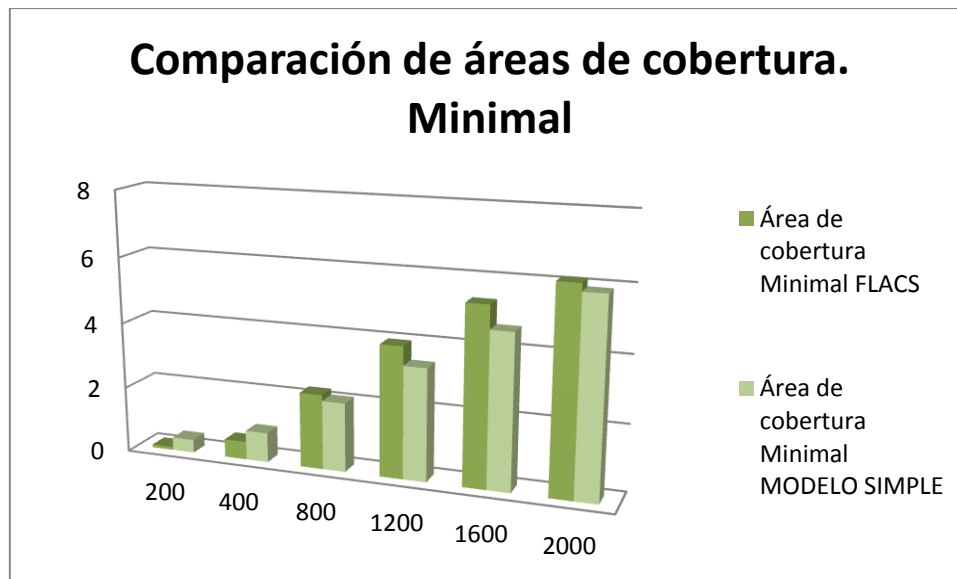


FIGURA 41: COMPARACIÓN DE LAS ÁREAS DE COBERTURA DE LAS REGIONES MINIMAL, DADAS POR LAS SIMULACIONES CON FLACS Y CON EL MODELOS SIMPLE.

Finalmente, en esta sección queda expuesto cómo el nivel de descripción de un modelo es función de la complejidad del mismo, del tiempo de ejecución y, en consecuencia, de la aplicación a la etapa pertinente en la gestión de emergencias y desastres.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES GENERALES

La gestión integral de riesgos conforma un concepto relativamente nuevo y debería ser tomado como objetivo por cada una de las personas que habitamos este planeta. Sepamos que todos, en diferentes medidas estamos expuestos a un nivel de riesgo que es función de las capacidades, amenazas y vulnerabilidades, y conocerlo, estudiarlo y actuar en consecuencia de ello nos ayuda a mitigar⁸. En lo que a incidentes químicos respecta, los modelos de simulación constituyen una importante herramienta ya sea para la respuesta a una emergencia en tiempo real, como para la planificación en supuestos escenarios y condiciones. El tipo de modelo adecuado para su aplicación dependerá del nivel de detalle de simulación y del tiempo disponible para la ejecución. Estas dos características están íntimamente relacionadas y son directamente proporcionales.

A la actualidad, se encontró una importante vacancia en los modelos de exposición a incidentes agudos, ya que, si bien el tiempo disponible para actuar es un factor condicionante en la respuesta a emergencias, los mismos no suelen contemplar la variable temporal en sus cálculos y es así como los modelos de uso corriente presentan en situaciones de emergencia una foto estática de las regiones de amenaza. Como hemos desarrollado en esta tesis, es un avance importante para la gestión de riesgos que los respondedores o decisores en una emergencia puedan conocer la evolución temporal no sólo de la nube tóxica sino además de las regiones de daño representativas de la población potencialmente expuesta y las sintomatologías asociadas.

En esta tesis se ha logrado desarrollar un modelo de exposición para incidentes químicos, DDC, que hace uso de los índices toxicológicos típicos para incidentes agudos (AEGLs, ERPGs, TEELs). El mismo presenta numerosas y evidentes ventajas frente a los métodos vigentes, optimizando los tiempos y mecanismos de respuesta, del mismo modo que la planificación de desastres.

⁸ Mitigación: Conjunto de acciones para reducir o eliminar la fuerza de una amenaza, mediante la eliminación de las vulnerabilidades de los sistemas y sus componentes.

Por un lado, DDC es capaz de proporcionar una estimación progresiva de los daños experimentados, y es así como la información cronológica de los efectos potenciales experimentados por la población expuesta es ofrecida por este nuevo método. Utilizando el campo continuo propuesto de los índices toxicológicos, siempre es posible realizar el acoplamiento de dos exposiciones diferenciales y en consecuencia de dos efectos parciales.

La fortaleza de DDC se encuentra en las operaciones de acoplamiento; por lo tanto este modelo puede utilizar siempre que sea posible la aplicación de un método de interpolación y extrapolación en el tiempo para los índices. Es así que la mejora de los índices toxicológicos contribuye a la mejora de DDC. **DDC siempre tiene en cuenta el grado de proximidad a las curvas dato de isodaño**, de modo que teniendo en cuenta que se basa en la noción de un campo continuo de curvas, el resultado concluye en un enfoque más descriptivo. Los métodos actuales no cuantifican la gravedad entre dos curvas dato de isodaño, y sólo se da un valor entero de los daños.

Por otra parte, DDC proporciona información sobre el nivel de daño mínimo y máximo de exposición, lo cual resulta útil para los responsables en la gestión de emergencias, ya que ofrece un intervalo de estimación que asegura contener al daño “verdadero”.

El algoritmo de DDC permite también introducir resultados de estudios experimentales que asocien pares tiempo-concentración con nivel de daño o niveles de respuesta. Esto contribuye a una información más detallada para armar el campo continuo y en consecuencia a un resultado más completo y descriptivo.

En esta tesis, además de validarse frente a otras metodologías de uso corriente como lo son ALOHA y el método español, se ha aplicado DDC a dos tipos de escenario: Parque Industrial de Pilar- ARG y Chicago- E.E.U.U; acoplándose a diferentes modelos de transporte de contaminantes en aire: modelo simple de resolución numérica, modelos de gases densos (ALOHA) y CFD (FLACS); analizando de este modo la modularidad de DDC, junto a las fortalezas y debilidades de los acoplamientos.

El acoplamiento de DDC con el modelo simple de resolución numérica permitió visualizar y analizar las ventajas de contar con información de la evolución de la nube tóxica, del mismo modo que de las regiones de daño. Con este acoplamiento se pudo visualizar los tiempos disponibles para actuar, la información cuantitativa, temporal y espacial de la población potencialmente afectada, la relación entre la bondad de los resultados finales con la bondad del modelo de transporte y el uso potencial para manejo de emergencias en tiempo real, entre

otras cosas. Como futura línea de investigación, sería interesante validar y poner a punto el modelo desarrollado en el capítulo III con datos de monitoreo adecuados a la situación.

El acoplamiento con ALOHA permitió validar a DDC y además entender que una estimación más precisa contribuye a mejores decisiones y respuestas. Igual que en el caso anterior la variable temporal juega un papel muy importante, del mismo modo que el campo continuo contribuye a proporcionar información más detallada.

El acoplamiento de FLACS con DDC, por su parte, mostró ser una herramienta poderosa para la planificación en la respuesta a emergencias en ciudades, debido a su capacidad para describir el flujo en zonas densamente edificadas, su precisión para estimar el daño potencial en la población expuesta a través de una estimación minimal y otra maximal, su versatilidad para utilizar diferentes índices de exposición aguda y su capacidad para estimar en forma temporal las superficies de afectación y el número de individuos alcanzados por la nube tóxica.

Los resultados aquí expuestos demuestran cómo el conocimiento de la influencia de los obstáculos en la trayectoria de la nube tóxica, y en la dispersión de los contaminantes transportados, junto a la información dinámica de la población potencialmente afectada y los síntomas asociados, contribuyen a una mejor planificación de las medidas de protección y respuesta ya que permite una mejor comprensión de la situación y del tiempo disponible para la intervención oportuna. Cómo bien se mencionó en el desarrollo de esta tesis, cualquier detalle que se aporte para estudiar vulnerabilidades, capacidades de respuesta y amenazas, resulta de suma importancia para la gestión de riesgos y en definitiva para nuestra propia existencia.

REFERENCIAS

- 1) El Proyecto Esfera. Carta Humanitaria y normas mínimas para la respuesta humanitaria. Tercera edición 2011. ISBN 978-1-908176-02-8. Disponible en: http://www.sphereproject.org/component/option,com_docman/task,cat_view/gid,46/Itemid,203/lang,spanishf/, accedido en febrero de 2012.
- 2) Asociación de Proyectos Comunales de El Salvador (PROCOMES). Manual de Conceptos básicos sobre gestión de riesgo y preparación local ante desastres. OXFAM, ECHO. 2008.
- 3) Sistema Crisis. Disponible en: <http://www.sistema-crisis.gob.ar/>, accedido en febrero de 2012.
- 4) Acquesta AD, Defeo G, Tarulla F, Giraldez G, Gonzalez EM, Kuntscher L, Jacovkis PM, Porta AA, Sánchez EY, Filkensteyn A; 2010. Sistemas informáticos para el manejo Interagencial de emergencias. I Congreso Latinoamericano SRA-LA 2010: "El estado del análisis de riesgo en América Latina". Memorias del congreso, pp. 1.
- 5) Acquesta AD, Sevilla AG, Giraldez G, Defeo G, Tarulla F, Sánchez EY, Filkensteyn A, Porta A, Jacovkis PM; 2008. Proyecto Crisis: Modelos computacionales para manejo de emergencias en tiempo real. II Congreso Argentino de la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental (SETAC). Libro de Resúmenes, pp. 28.
- 6) Acquesta AD, Sevilla AG, Giraldez G, Defeo G, Tarulla F, Sánchez EY, Filkensteyn A, Porta A, Jacovkis P; 2009- Sistema Crisis. XVI Congreso Argentino de Toxicología (Puerto Madryn, Argentina).
- 7) La crisis bajo control. Miradas al sur. Año 3. Edición número 150. Domingo 3 de abril de 2011. Disponible en <http://sur.elargentino.com/notas/la-crisis-bajo-control>, accedido en febrero de 2012.
- 8) Rizo R., Llorens F., Pujol M; 2002. Arquitecturas y comunicación entre agentes- pp 181-214.
- 9) García Serrano A., Ossowski S. Inteligencia Artificial Distribuida y Sistemas Multiagentes. Inteligencia Artificial, Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial, 1998; 2(6):1-12.
- 10) Sánchez EY y Acquesta AD; 2011 El Sistema CRISIS para la Gestión de Riesgos. Tesina de la diplomatura en Gestión de Riesgo a para Emergencias y Desastres. Consejo Provincial de Emergencias e Instituto Provincial para la Administración Pública, PBA. La Plata, Argentina. Diciembre.
- 11) Peña CE, Carter DE, Ayala-Fierro F. 2001. Toxicología Ambiental: Evaluación de Riesgos y Restauración Ambiental. Disponible en <http://superfund.pharmacy.arizona.edu/toxamb/>, accedido en diciembre de 2011.

- 12) National Ocean Service (NOAA's), Office on Response and Restoration. Disponible en: [http://response.restoration.noaa.gov/topic_subtopic_entry.php?RECORD_KEY\(entry_subtopic_topic\)=entry_id,subtopic_id,topic_id&entry_id\(entry_subtopic_topic\)=662&subtopic_id\(entry_subtopic_topic\)=24&topic_id\(entry_subtopic_topic\)=1#whatsubs](http://response.restoration.noaa.gov/topic_subtopic_entry.php?RECORD_KEY(entry_subtopic_topic)=entry_id,subtopic_id,topic_id&entry_id(entry_subtopic_topic)=662&subtopic_id(entry_subtopic_topic)=24&topic_id(entry_subtopic_topic)=1#whatsubs), accedido en diciembre de 2011.
- 13) Ruiz Boada F, González Ferradas E, Miñana Aznar A; 2003. Zonas de Planificación para accidentes graves de tipo tóxico. Guía técnica (en el ámbito del Real Decreto 1254/99 [Seveso II]). Murcia, Universidad de Murcia. 174 p.
- 14) Subcommittee on Acute Exposure Guideline Levels, Committee on Toxicology, Board on Environmental Studies and Toxicology, National Research Council; 2001. Standing Operating Procedures for Developing Acute Exposure Guideline Levels for Hazardous Chemicals. Washington, DC, National Academies Press. 224 p.
- 15) American Industrial Hygiene Association, Emergency Response Planning (ERP) and Workplace Environmental Exposure Level (WEEL) Committees. Emergency Response Planning Guidelines (ERPG) & Workplace Environmental Exposure Levels (WEEL) Handbook. Washington, DC, AIHA, 2007.
- 16) Craig DK y Lux CR. Methodology for Deriving Temporary Emergency Exposure Limits (TEELs). Westinghouse Safety Management Solutions. Aiken, SC: U.S. Westinghouse Savannah River Company, WSRC-TR-98-00080, 1998.
- 17) Craig DK, Davis JS, Hansen DJ, Petrocchi AJ, Powell TJ, Jr. Tuccinardi TE. Derivation of Temporary Emergency Exposure Limits (TEELs). Journal of Applied Toxicology, 2000; 20: 11-20.
- 18) Stage SA. Determination of acute exposure guideline levels in a dispersion model. Journal Air Waste Management Association, 2004; 54: 49-59.
- 19) U.S. Environmental Protection Agency. National Advisory Committee for Acute Exposure Guideline Levels (AEGLs) for Hazardous Substances. Fed. Regist. 1997, 62 (210), 58840-58851.
- 20) U.S. Environmental Protection Agency. National Advisory Committee for Acute Exposure Guideline Levels (AEGLs) for Hazardous Substances; Proposed AEGL Values. Fed. Regist. 2000, 65 (51), 14186-14197.
- 21) U.S. Environmental Protection Agency. National Advisory Committee for Acute Exposure Guideline Levels (AEGLs) for Hazardous Substances; Proposed AEGL Values. Fed. Regist. 2001, 66 (85), 21940-21964.

- 22) Subcommittee on Acute Exposure Guideline Levels, Committee on Toxicology, Board on Environmental Studies and Toxicology. Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals: Volume 1; National Research Council: Washington, DC, 2000. 220 p.
- 23) Subcommittee on Acute Exposure Guideline Levels, Committee on Toxicology, Board on Environmental Studies and Toxicology. Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals: Volume 2; National Research Council: Washington, DC, 2002. 292 p.
- 24) Subcommittee on Acute Exposure Guideline Levels, Committee on Toxicology, Board on Environmental Studies and Toxicology. Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals: Volume 3; National Research Council: Washington, DC, 2003. 516 p.
- 25) Subcommittee on Acute Exposure Guideline Levels, Committee on Toxicology, Board on Environmental Studies and Toxicology. Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals: Volume 4; National Research Council: Washington, DC, 2004. 310 p.
- 26) Subcommittee on Acute Exposure Guideline Levels, Committee on Toxicology, Board on Environmental Studies and Toxicology. Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals: Volume 5; National Research Council: Washington, DC, 2007. 292 p.
- 27) Subcommittee on Acute Exposure Guideline Levels, Committee on Toxicology, Board on Environmental Studies and Toxicology. Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals: Volume 6; National Research Council: Washington, DC, 2008. 318 p.
- 28) Subcommittee on Acute Exposure Guideline Levels, Committee on Toxicology, Board on Environmental Studies and Toxicology. Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals: Volume 7; National Research Council: Washington, DC, 2009. 250 p.
- 29) Subcommittee on Acute Exposure Guideline Levels, Committee on Toxicology, Board on Environmental Studies and Toxicology. Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals: Volume 8; National Research Council: Washington, DC, 2010. 464 p.
- 30) U.S. Environmental Protection Agency. Disponible en:

<http://www.epa.gov/opptintr/aegl/>, accedido en febrero de 2012.
- 31) U.S. Environmental Protection Agency. Disponible en:

<http://www.epa.gov/OEM/content/cameo/aloha.htm>, accedido en febrero de 2012.
- 32) U.S. Environmental Protection Agency, National Oceanic and Atmospheric Administration. User's manual. February 2007. Disponible en:

<http://www.epa.gov/OEM/docs/cameo/ALOHAManual.pdf>, accedido en febrero de 2012.

- 33) Committee on Toxicology, National Research Council, Subcommittee on the Toxicological Risks to Deployed Military Personnel. Review of the Army's Technical Guides on Assessing and Managing Chemical Hazards to Deployed Personnel. Washington, D.C., The National Academies Press, 2004.
- 34) Ten Berge WF, Zwart A, Appelman LM. Concentration-time mortality response relationship of irritant and systemically acting vapours and gases. *Journal of Hazardous Materials*, 1986; 13: 301-309.
- 35) Gelzleichter TR, Witchi H, Last JA. Concentration-response relationships of rat lungs to exposure to oxidant air pollutants: A critical test of Haber's Law for ozone and nitrogen dioxide. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 1992; 112: 73–80.
- 36) Busvine JR. The toxicity of ethylene oxide to *Calandra oryzae*, *S. granarius*, *Tribolium castaneum* and *Cimex lecturalis*. *Annals of Applied Biology*, 1938; 25: 605–632.
- 37) Hilderman TL, Hrudey SE, Wilson DJ. A model for effective toxic load from fluctuating gas concentrations. *Journal of Hazardous Materials*, 1999; A 64: 115–134.
- 38) Bliss CI. The method of Probits. *Science* 79, 1934; 38–39.
- 39) Bliss CI. The method of Probits- A correction. *Science* 79, 1934; 409–410.
- 40) Withers RMJ y Lees FP. The assessment of major hazards: The lethal toxicity of chlorine. Part 1, Review of information on toxicity. *Journal of Hazardous Materials*, 1985; 12: 231–282.
- 41) Withers RMJ y Lees FP. The assessment of major hazards: The lethal toxicity of chlorine. Part 2, Model of toxicity to man. *Journal of Hazardous Materials*, 1985; 12: 283–302.
- 42) Miller FJ, Schlosser PM, Janszen DB. Haber's rule: a special case in a family of curves relating concentration and duration of exposure to a fixed level of response for a given endpoint. *Toxicology*, 2000; 149: 21–34.
- 43) Salem H y Katz SA. *Inhalation Toxicology*: 2nd ed., Chapter 2. CRC Press, Boca Raton, Florida. 2006.
- 44) Griffiths RF y Megson LC. The effect of uncertainties in human toxic response on hazard range estimation for ammonia and chlorine. *Atmospheric Environment*, 1984; 18: 1195–1206.
- 45) Griffiths RF y Harper AS. A speculation on the importance of concentration fluctuations in the estimation of toxic response to irritant gases. *Journal of Hazardous Materials*, 1985; 11: 369–372.

- 46) Griffiths RF. The use of probit expressions in the assessment of acute population impact of toxic releases. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1991; 4: 49–57.
- 47) Compiled AEGLs, U.S. Environmental Protection Agency. Disponible en:
http://www.epa.gov/oppt/aegl/pubs/compiled_aegls_sept2010_v2.pdf, accedido en febrero de 2012.
- 48) Klaassen CD, Amdur MO, Doull J, Casarett y Doull's Toxicology, The basic science of poisons, 3rd. Ed. Chap. 2, Macmillan, New York, 1986.
- 49) Caputo M, Gimenez M, Schlamp M; 2004. Dispersión de Contaminantes en la Atmósfera: Análisis de Modelos. *Mecánica Computacional*, Volume XXIII. Number 16. Atmospheric Dispersion Problems. pp. 1727-1741.
- 50) Dandrieux A, Dimbour JP, Dusserre G. Are dispersion models suitable for simulating small gaseous chlorine releases? *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2006; 19: 683–689.
- 51) Doury A. A design basis for the operational modelling of atmospheric dispersion. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1988; 1: 156–162.
- 52) Beychok M. Fundamentals of stack gas dispersion. 3rd Ed. Irvine, CA, 1994.
- 53) Hanna SR, Drivas PJ. Guidelines for the use of vapor cloud dispersion models. (CCPS/AIChE, New York, NY), 1987.
- 54) Hanna SR, Strimaitis DG. Workbook of test cases for vapor cloud source emission and dispersion models. (CCPS/AIChE, New York, NY), 1988.
- 55) Reynolds RM. ALOHA Theoretical Description; Draft Technical Memorandum NOS ORCA-65 Hazardous Materials Response and Assessment Division (HMRAD) of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA): Seattle, WA, 1992.
- 56) Hanna SR, Hansen OR, Ichard M, Strimaitis D. CFD model simulation of dispersion from chlorine railcar releases in industrial and urban areas. *Atmospheric Environment*, 2009; 43: 262–270.
- 57) Delaunay D. Numerical simulation of atmospheric dispersion in an urban site: Comparison with field data. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1996; 64(2–3): 221–231.
- 58) Hanna S, White J, Hannan J, Kolbe R, Kiley C, Brown M, Harris T, Wang Y, Fry R, Bowers J, Garvey D, Williamson C, Moussafir J. An intercomparison of diagnostic urban wind flow models based on the rökke methodology using the joint urban 2003 field data. *Proceedings of the 6th International Conference on Urban Air Quality*. Limassol, Cyprus, 2007.

- 59) Schlitchting H. Teoría de la capa límite. Urmo, S.A. de Ediciones, Bilbao. 1972
- 60) Batchelor GK. Introducción a la dinámica de fluidos. Cambridge University Press. 1997.
- 61) Crowe CT, Elger DF, Roberson JA, Romo Muñoz JH. Mecánica de fluidos. México : Grupo Patria Cultural, 2002. Reimpreso en el 2006.
- 62) Hinze JO. Turbulence, 2nd ed. New York: McGraw-Hill. 1975.
- 63) Bird RB, Stewart WE, Lightfoot EN. Transport phenomena. John Wiley & Sons, New York, 2002.
- 64) Nigro N, Storti M. Método numéricos en fenómenos de transporte. Disponible en: www.cimec.org.ar/cfd, accedido en febrero de 2012.
- 65) Markiewics M. Modelling of the air pollution dispersion. The Faculty of Environmental Engineering. Warsaw University of Technology. Disponible en: http://manhaz.cyf.gov.pl/manhaz/monography_2006_5/part02/5_M_Markiewicz_Modelling%20of%20the%20Air%20pollution%20Dispersion.pdf, accedido en febrero de 2012.
- 66) Pasquill F. The Estimation of the Dispersion of Windborne Material, Meteorological Magazine, 1961; 90: 33-49.
- 67) Santa Cruz ASM. Difusión de contaminantes gaseosos en la atmósfera. Área informática aplicada a la ingeniería, Departamento de Ingeniería Química, Facultad Regional Rosario, Universidad Tecnológica Nacional.
- 68) Gifford FA Jr. Use of Routine Meteorological Observation for Estimating Atmospheric Dispersion, Nuclear Safety, 1961; 2: 47-51.
- 69) Turner DB. Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates. Environmental Protection Agency, Office of Air Programs, Research Triangle Park, North Carolina, 1970.
- 70) Csanady GT. Turbulent Diffusion in the environmental. Reidel Dordreeht. 248 p.
- 71) Taylor GI. Diffusion by continuous movements. Proc. R. Soc. London Ser., 1921; A-20: 196-211.
- 72) Crank J. The mathematics of diffusion. Oxford Univ. Press (Clarendon), London and New York. 1956.
- 73) Parra Guevara D. Solución numérica de la ecuación de difusión-advección-reacción con un esquema de separación de operadores. Miscelánea Matemática, 2004; 39: 1–16.
- 74) Seinfeld JH y Pandis SN. Atmospheric Chemistry and Physics, from Air Pollution to Climate Change, John Wiley, New York, 1998.

- 75) McRae GJ, Goodin WR, Seinfeld JH. Numerical solution of the atmospheric diffusion equation for chemically reacting flows, *J. Comput. Phys.*, 1982; 45: 1-42.
- 76) De Zeeuw D, Powell KG. An Adaptively Refined Cartesian Mesh Solver for the Euler Equations. *Journal of Computational Physics*, 1993; 104: 56-68.
- 77) Douglas J, Kellogg RB, Varga RS. Alternating direction methods for n space variables. *Mathematics of Computation*, 1963; 17 (83): 279-282.
- 78) Karlsen KH, Risebro NH. An operator splitting method for nonlinear convection-diffusion equations. *Numerische Mathematik*, 1997; 77 (3): 365-382.
- 79) Oñate E, Arraez JA. Avances del cálculo infinitesimal en mecánica computacional. *Mecánica Computacional*, 2002; 21: 1634-1651.
- 80) Acquesta A.D, Sanchez E.Y, Jacovkis P. M. (2012) El Sistema Crisis para Gestión de Riesgos y Emergencias. II Congreso Regional de la Society for Risk Analysis Latin America (SRA-LA Abril 2012, Bogotá-Colombia). Resumen enviado y aceptado para exposición oral.
- 81) Sánchez EY, Colman JE, Acquesta AD, Porta AA, Jacovkis PM. Análisis de escenarios de desastre químico a través de DDC acoplado a modelos de transporte. VII Congreso de Medio Ambiente de la AUGM, La Plata. Resumen enviado y aceptado. ID 809. 2012.
- 82) Sanchez E.Y, Acquesta A.D, Colman Lerner J.E, Porta A.A, Jacovkis P.M. (2012) Análisis de escenarios de escape de cloro mediante la simulación con DDC acoplado a diferentes modelos de dispersión en aire. II Congreso Regional de la Society for Risk Analysis Latin America (SRA-LA Abril 2012, Bogotá-Colombia). Resumen extendido enviado y aceptado para exposición oral.
- 83) Sánchez EY, Gonzalez EM, Colman JE, Porta AA, Jacovkis PM, Acquesta AD. Modelo y simulación de regiones de afectación por un incidente químico. Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología Ambiental, y I Congreso Nacional de la Sociedad Argentina de Ciencia y Tecnología Ambiental, Mar del Plata. Artículo completo aceptado para su publicación en actas del congreso R070. 2012.
- 84) Sánchez EY, Acquesta AD, Jacovkis PM, Porta A. Aplicación de modelos no estacionarios de distribución de contaminantes en el manejo de emergencias químicas. VI Congreso Argentino de Química Analítica. Santa Fé, Argentina. Poster. 2011.
- 85) Sánchez EY, Gonzalez EM, Porta AA, Jacovkis PM, Acquesta AD. Simulación de un accidente químico con la herramienta CFD-DDC: planificación de respuesta a emergencias en ciudades. *Contaminación Atmosférica e Hídrica en Argentina*; E. Puliafito (Ed.). Universidad Tecnológica Nacional, 2011; pp 257-268. ISBN 978-950-42-0136-6

- 86) Sánchez EY, Gonzalez EM, Colman Lerner JE., Porta AA, Jacovkis PM., Acquesta AD. Emergency response planning in cities: coupling of the FLACS CFD model and DDC. Enviado para su publicación a Risk Analysis, 2011: Manuscript No. RA-00457-2011
- 87) Sánchez EY, Gonzalez EM, Porta AA, Jacovkis PM, Acquesta AD. Planeamiento del manejo de emergencias en ciudades: Acoplamiento de modelos de transporte y exposición. III Reunión anual PROIMCA y I Reunión anual PRODECA. (Mendoza., Argentina), 2011.
- 88) Sánchez EY, Acquesta AD, Porta AA, Jacovkis PM. Simulación de accidentes químicos: Evaluación de exposición con modelos no estacionarios. I Congreso Latinoamericano SRA-LA 2010: "El estado del análisis de riesgo en América Latina" (Santiago, Chile), 2010. Memorias del congreso, pp. 9.
- 89) Acquesta AD, Sánchez EY, Porta A, Jacovkis P. A method for computing the damage level due to the exposure to an airborne chemical with a time-varying concentration. Risk Analysis, 2010; 31(9): 1451-1469.
- 90) Acquesta AD, Sánchez EY, Porta AA, Jacovkis PM. Método de cálculo del daño provocado por la exposición a un perfil variable en el tiempo, de concentración de contaminantes en el aire. II Congreso Argentino de la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental- SETAC (Mar del Plata, Argentina), 2008. Libro de Resúmenes, pp. 50.
- 91) Centro de Información Química para Emergencias. Reporte de 4 accidentes con sustancias químicas ocurridos en Argentina entre junio 1991 y diciembre 1992. Centro de información en salud y desastres: Nicaragua, 2002.
- 92) Consultora Estrucplan, Portal de seguridad y medio ambiente, Argentina. Disponible en: <http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=2254>, accedido en diciembre de 2011.
- 93) Municipalidad de Pilar, Argentina. Disponible en: <http://www.pilar.gov.ar>, accedido en diciembre de 2011.
- 94) Management of Health and Environmental Hazards (MANHAZ). Models and Techniques for Health and Environmental Hazard Assessment and Management. Markiewicz, Part 2.4: Mathematical Modelling Heavy Gas Dispersion. Otwock-Swierk, Poland.
- 95) Amoores JE, and Hautala E. Odor as an aid to chemical safety: Odor thresholds compared with Threshold Limit Values and volatilities for 214 industrial chemicals in air and water dilution. Journal of Applied Toxicology, 1983; 3: 272-290.
- 96) Zannetti P. Air Pollution Modeling: Theories, Computational Methods and Available Software. Computational Mechanics Publications, Southampton, UK, 1990; pp. 299–308.

- 97) Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC), disponible de <http://200.51.91.237/GPIP/PostPoligono.xml>, accedido en diciembre de 2011.
- 98) Warner S, Platt N, Urban JT, Heagy JF. Comparisons of transport and dispersion model predictions of the joint urban 2003 field experiment. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008; 4: 1910–1928.
- 99) Sklavounos S, Rigas F. Simulation of Coyote series trials – Part I: CFD estimation of non-isothermal LNG releases and comparisons with box-model predictions. *Chemical Engineering Science*, 2005; 61: 1434–1443.
- 100) Hanna SR, Dharmavaram S, Zhang J, Sykes I, Witlox H, Khajehnajafi S, Koslan K. Comparison of six widely-used dense gas dispersion models for three recent chlorine railcar accidents. *Process Safety Progress*, 2008; 27: 248–259.
- 101) Hanna SR, Chang JC, Strimaitis DG. Hazardous gas model evaluation with field observations. *Atmospheric Environmental*, 1993; 27A: 2265–2285.
- 102) Hanna SR, Hansen OR, Dharmavaram S. FLACS CFD air quality model performance evaluation with Kit Fox, MUST, Prairie Grass, and EMU observations. *Atmospheric Environment*, 2004; 38(28): 4675–4687.
- 103) GexCon US. CFD Validation. Disponible en: http://gexconus.com/CFD_validation. Accedido en diciembre de 2011.
- 104) Hjertager BH. Computer simulation of turbulent reactive gas dynamics. *Journal of Modelling, Identification and Control*, 1985; 5: 211–236.
- 105) Hjertager BH. Three-dimensional modelling of flow, heat transfer, and combustion. *Handbook of Heat and Mass Transfer*, Chap. 4. Gulf Publishing Company, PO Box 2608, Houston, TX; 1986. 304-350.
- 106) Hjertager BH, Bjørkhaug M, Fuhre K. Gas explosion experiments in 1:33 scale and 1:5 scale; offshore separator and compressor modules using stoichiometric homogeneous fuel-air clouds. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1988; 1: 197–205.
- 107) Hjertager BH, Bjørkhaug M, Fuhre K. Explosion propagation of nonhomogeneous methane-air clouds inside an obstructed 50 m³ vented vessel. *Journal of Hazardous Materials*, 1988; 19: 139–153.
- 108) Hanna SR, Hansen OR, Dharmavaram S. Evaluation of FLACS CFD model with MUST data. AMS meeting. Vancouver, Canada: 13.3, 2004.

- 109) Quaranta N, DeMartini A, Bellasio R, Bianconi R, Marioni M. A decision support system for the simulation of industrial accidents. *Environmental Modelling and Software*, 2002; 17: 497–504.
- 110) Chicago Neighborhoods: Population & Population Density: 1980 to 2000. Demographia. Wendell Cox Consultancy, Belleville, USA. Disponible en: <http://www.demographia.com/db-chi-nhd2000.htm>. Accedido en febrero de 2012.